

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

Návrh výroby tepelného výměníku

Production Proposal Heat Exchanger

Student:

Bc. Jan Hrdina

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.

Datum odevzdání:

16.5.2016

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jan Hrdina**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Specializace: 20 Strojírenská technologie
Téma: **Návrh výroby tepelného výměníku**
Production Proposal Heat Exchanger

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Posouzení současného stavu a návrh základního materiálu výměníku.
2. Návrh svarových spojů tlakového celku.
3. Volba parametrů svařování jednotlivých svarových spojů.
4. Návrh zkoušek svarových spojů s ohledem na schválení postupů svařování WPS a WPQR.
5. Technologický postup výroby tepelného výměníku.

Seznam doporučené odborné literatury:

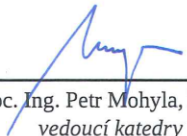
KOUKAL, J., SCHWARZ, D., HAJDÍK, J. *Materiály a jejich svařitelnost*. (Učební texty pro kurzy IWE/IWT). Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2009, 241 s. ISBN 978-80-248-2025-5.
HLAVATÝ, I. *Teorie a technologie svařování*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2009, poslední revize 20. 10. 2011. Dostupné z: < <http://fs1.vsb.cz/~hla80> >. ISBN 978-80-248-2414-7.
HRIVŇÁK, I. *Zváranie a zvariteľnosť materiálov*. Bratislava: Veda, 2009, 486 s. ISBN 97-880-2273-167-6.
PTÁČEK, L. A KOL. *Nauka o materiálu I.*. Praha: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. 2001, 505 s. ISBN 80-7204-193-2.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.**

Datum zadání: 11.12.2015

Datum odevzdání: 16.05.2016


doc. Ing. Petr Mohyla, Ph.D.
vedoucí katedry




doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 16.5. 2016


.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 16.5. 2016

.....
podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Jan Hrdina

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Boční č. 553

783 72 Velký Týnec

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

HRDINA, J. Návrh výroby tepelného výměníku: Diplomová práce. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2016, 74 s. Vedoucí práce: Hlavatý, I.

Tato diplomová práce se zabývá problematikou svařování při výrobě tepelného výměníku. V úvodu je popsána firma Promont a.s., kde byl diplomový projekt vypracován. Navazující část popisuje tepelné výměníky, jejich druhy a popis funkce. Dále je obsažen rozbor norem, kterým tepelné výměníky podléhají. Hlavním bodem teoretické části, jsou materiály používané při výrobě tohoto zařízení, jejich vlastnosti, charakteristika a chování za provozních podmínek. Následně je proveden návrh výroby tepelného výměníku zaměřen převážně na problematiku svařování. Hlavním cíl práce je navrhnout technologie svařování tak, aby odpovídaly požadavkům kladeným na toto zařízení, a legislativě, vztahující se na tuto problematiku. Závěr práce obsahuje zkoušky provedené na tepelném výměníku a zhodnocení technických parametrů.

ANNOTATION OF THESIS

HRDINA, J. Production Proposal Heat Exchanger: Dissertation. OSTRAVA: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2016, 74 p., Supervisor: Hlavatý I.

This thesis deals with the issue of welding during a production of a heat exchanger. In the introduction, there is a description of the company Promont a.s. where the diploma project was performed. The following part describes heat exchangers, their types and functions. Next, there is an analysis of norms included which have effects on heat exchangers. The main point of the theoretical part is the materials which are used for the production of this device, their features, characteristic and behaviour during the working conditions. It is followed by the layout of the production of a heat exchanger with the specific focus on the issue of welding. The main purpose of the thesis is to design the technologies of welding so that they match the demands put on the device and the legislation related to the issue. The conclusion of the thesis contains the tests which were performed on the heat exchanger and the evaluation of the technical parameters.

Obsah

Úvod.....	10
1 Tepelné výměníky	11
1.1 Rozdělení tepelných výměníků:	11
1.1.1 Trubkové výměníky.....	11
1.1.2 Deskové výměníky	11
1.1.3 Speciální výměníky tepla.	12
1.2 Výměník tepla se svazkem trubek v plášti.....	13
2 Normy vztahující se na tepelné výměníky	14
2.1 Všeobecné požadavky na materiály tepelných výměníků	15
2.2 Materiály používané pro výrobu výměníků dle normy	15
2.3 Všeobecné technické podmínky pro použití materiálu při výrobě tlakového zařízení	16
2.4 Požadavky na materiály používané na tlakové části průmyslových potrubí .	16
2.5 Hlavní požadavky kladené na tlakové části	17
3 Návrh základního materiálu tepelného výměníku.....	18
3.1 Charakteristika základního materiálu	18
3.2 Svařitelnost základního materiálu.....	19
3.3 Vliv chemických prvků obsažených v oceli 1.4541 na její svařitelnost.....	20
3.4 Svařování vysokolegovaných ocelí	22
3.5 Struktura vysokolegovaných ocelí.....	23
3.6 Svařitelnost Austenitických Cr-Ni ocelí	25
3.7 Hlavní činitele ovlivňující svařitelnost austenitických korozivzdorných ocelí.	26
3.7.1 Teplé krystalizační trhliny	26
3.7.2 Mezikrystalová koroze	27
3.7.3 Chemické složení.....	28

3.7.4	Vliv stabilizačních prvků	28
3.7.5	Vliv tepelného zpracování	29
4	Experimentální část práce	31
4.1	Návrh svarových spojů pláště tepelného výměníku	31
4.1.1	Podélný svar zakruženého lubu	31
4.1.2	Obvodový svar	36
4.1.3	Svarový spoj trubka – trubkovnice	37
4.2	Technologický postup výroby tepelného výměníku	41
4.2.1	Úprava svarových ploch před svařováním	43
4.2.2	Zakružování děleného materiálu	44
4.2.3	Příprava před svařováním	45
4.2.4	Svařování jednotlivých lubů	46
4.2.5	Výroba trubkovnice	48
4.2.6	Kompletace pláště výměníku	49
4.2.7	Výroba a instalace hrdel	52
4.2.8	Montáž trubek	55
4.2.9	Svařování trubka-trubkovnice.	56
4.3	Schválení postupů svařování (WPS, WPQR)	59
5	Závěrečné zhodnocení technických parametrů tepelného výměníku	70
6	Závěr	71
	Seznam použité literatury a norem	72
	Seznam příloh	74

Seznam použitých značek a symbolů

$A_{[50]}$	tažnost	[%]
AC	střídavý proud	[A]
D	průměr	[mm]
DC	stejnoseměrný proud	[A]
I	proud	[A]
k	koefficient tepelné účinnosti	
KV	nárazová práce	[J/20°C]
m	hmotnost	[kg]
Q	tepelný příkon	[KJ/mm]
R	poloměr	[mm]
Re	mez kluzu	[MPa]
Rm	mez pevnosti	[MPa]
V	objem	[m^3]
v	rychlost	[mm/min]

ČSN	ČESKÉ STÁTNÍ NORMY
ISO	MEZINÁRODNÍ NORMY
EN	EVROPSKÉ NORMY
WPS	SPECIFIKACE POSTUPU SVAŘOVÁNÍ
WPQR	PROTOKOL O KVALIFIKACI POSTUPU SVAŘOVÁNÍ
135 (MAG)	RUČNÍ OBLOUKOVÉ SVAŘOVÁNÍ V OCHRANNÉM PLYNU
141	RUČNÍ OBLOUKOVÉ SVAŘOVÁNÍ NETAVÍCÍ SE ELEKTRODOU V OCHRANNÉM PLYNU
γ	GAMA
ARA	ANIZOTERMICKÝ ROZPAD AUSTENITU
PA SHORA	POLOHA SVAŘOVÁNÍ VODOROVNÁ
PC	POLOHA SVAŘOVÁNÍ VODOROVNÁ
BW	TUPÝ SVAROVÝ SPOJ
V	SVAR TVARU V
DIN	NEMECKÝ ÚSTAV PRO NORMALIZACI
AISI	AMERICKÁ NORMA
Si	Titan
P	Fosfor
C	Uhlík
S	Síra
Mn	Mangan
Cr	Chrom
Mo	Molybden
Ni	Nikl
Ti	Titan

Úvod

V chemickém průmyslu, energetice a dalších odvětvích se používá zařízení – tepelné výměníky, které dokáže vyrábět a přenášet tepelnou energii. Tento druh energie vyprodukované tepelným výměníkem, je využitelný nejen v průmyslu, ale i v běžné domácnosti.

Tepelný výměník je zařízení, jehož konstrukce umožňuje výměnu tepelné energie mezi soustavami objektů o různých parametrech. Tepelné výměníky složité konstrukce jsou nezbytnou součástí tepláren a chemických továren, naopak tepelné výměníky jednoduché konstrukce lze najít v podobě radiátorů, chladičů silničních vozidel, atd.

Předmětem diplomové práce je navržení výroby tepelného výměníku. Důvodem je nutná výměna již značně poškozeného původního výměníku obdobné trubkové konstrukce, který pracuje v chemickém provozu od roku 1985. Na již používaném zařízení se začaly objevovat trhliny na trubkách, díky kterým došlo ke ztrátě tlaku a znemožnění správné funkce. Z důvodu špatných podmínek opravy a nyní nízké účinnosti starého výměníku je třeba vyrobit nové zařízení.

Tato diplomová práce byla vytvořena ve firmě PROMONT a.s., která se od počátku založení věnuje komplexním dodávkám technologií pro chemický, potravinářský, farmaceutický, petrochemický a strojírenský průmysl. Společnost zajišťuje strojírenskou výrobu, montáž a údržbu speciálních aparátů a technologických celků. Firma PROMONT a.s. vyrábí různá technologická zařízení z rozmanitých materiálů včetně klasických uhlíkatých ocelí, nerezových ocelí, hliníku, titanu, atd. [5]

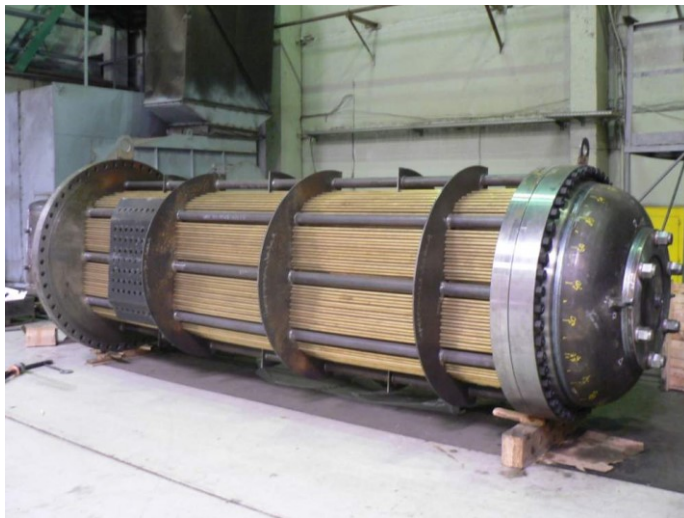
1 Tepelné výměníky

Tepelný výměník je zařízení, které umožňuje výměnu tepelné energie. Jako pracovní médium tohoto zařízení je nejčastěji použita voda jak v kapalném, tak v plynném skupenství. Zařízení pracuje s fyzikálními veličinami tlakem a teplotou. Navrhuje se tak, aby tepelná energie byla co nejlépe přenášena při co nejnižších ztrátách tlaku.

1.1 Rozdělní tepelných výměníků:

1.1.1 Trubkové výměníky

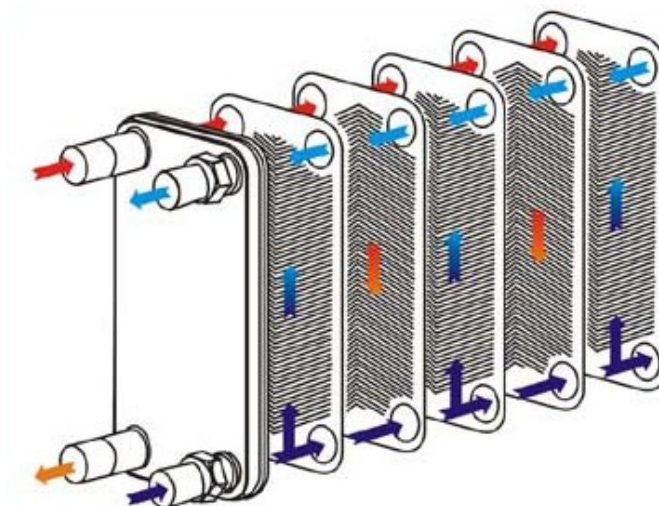
- s přímými trubkami (svazek trubek v plášti)
- s vinutými trubkami



Obr.1. Obvyklá konstrukce trubkového výměníku.

1.1.2 Deskové výměníky

- s rovnými deskami
- se spirálovými deskami
- lamelové



Obr.2. Schéma výměny tepla deskového výměníku [11]

1.1.3 Speciální výměníky tepla.



Obr.3. Tepelný výměník [7]

Předmětem diplomové práce je trubkový výměník se svazkem trubek v plášti.

1.2 Výměník tepla se svazkem trubek v plášti

Výměníky tepla se svazkem trubek v plášti jsou nedílnou součástí vybavení technologických procesů v chemickém průmyslu (obr. 1). Jde o zařízení složené z určitého množství trubek daného konstrukčním návrhem a technologickými požadavky. Princip činnosti představuje sdílení tepla mezi dvěma oddělenými proudy pracovního média, často rozdílného skupenství. Trubkový výměník je tvořen trubkovým a mezitrubkovým prostorem se vstupními a výstupními otvory sloužícím často i pro údržbu výměníku. Vnitřní prostor pláště je tvořen až stovkami trubek (obr. 1). Mezi svazkem trubek a pláštěm výměníku se nacházejí přepážky, které mají velký vliv na správnou činnost a požadovanou výměnu tepla. Přepážky zajišťují správný tok pracovního média kolem vnější stěny trubek a tím efektivně dochází k požadované tepelné výměně. Tyto přepážky neslouží pouze k tomuto účelu, ale mají i velký význam v konstrukci, kde tvoří oporu pro svazek trubek a tlumí vibrace. Dále jsou součástí výměníku této konstrukce dvě příruby, které se nazývají trubkovnice, jež jsou umístěny na obou koncích pláště výměníku.



Obr.4.: Vnitřní konstrukce výměníku. [5]

2 Normy vztahující se na tepelné výměníky

Tepelné výměníky jsou tlaková zařízení a ta podléhají normám pro výrobu tlakových zařízení, provozování a údržbu. V současné době platí evropské normy. Tlaková zařízení v České republice podléhají normám ČSN 69 0010 a ČSN EN 13 445.

Původní česká norma ČSN 69 0010 „Tlakové nádoby stabilní“ byla nahrazena evropskou normou ČSN EN 13 445 „Netopené tlakové nádoby“, která je rozdělena na části [6]:

- Všeobecné požadavky
- Materiály
- Konstrukce a výpočet
- Výroba
- Obecné požadavky na zkoušky a kontrolu
- Výroba tlakového celku
- Svařování
 - Postupy svařování.
 - Kvalifikace.
- Materiály pro používání za vysokých teplot

2.1 Všeobecné požadavky na materiály tepelných výměníků

Tepelné výměníky lze zařadit mezi tlakové nádoby. Materiály, konstrukce, svařování, kontrola a zkoušky těchto zařízení jsou předepsány a popsány v ČSN EN 13 445 a ČSN 69 0010.

Materiály tlakových nádob musí podle sbírky zákonů č.26/2003 splňovat několik následujících kritérií [6,12]:

- Materiály použité k výrobě tlakového zařízení musí být vhodné po celou dobu předpokládané životnosti.
- Materiály součástí vystavených tlaku musí mít vhodné vlastnosti za všech provozních podmínek a musejí být dostatečně houževnaté.
- Materiály musí být odolné proti křehkému lomu.

2.2 Materiály používané pro výrobu výměníků dle normy

Použitý materiál musí splňovat požadavky na něj kladené po celou dobu životnosti. Materiál lze označit za dostatečně tažný v případě, že při tahové zkoušce provedené normalizovaným postupem není jeho hodnota tažnosti menší než 14 % a její nárazová práce na zkušebních tyčích s vrubem ve tvaru V dle mezinárodní normy ČSN EN ISO 14556 není menší než 27 J při teplotě, která není větší než 20 °C, avšak není vyšší než nejnižší předpokládaná pracovní teplota. Zvolený materiál nesmí být ovlivněn stárnutím, musí být vhodný pro zvolené technologické postupy a musí být zvolen tak, aby se při vzájemném spojování různých materiálů zabránilo vzniku vad a veškerým nežádoucím účinkům. [6,12,11]

2.3 Všeobecné technické podmínky pro použití materiálu při výrobě tlakového zařízení

Materiály pro výrobu tlakového zařízení je nutné volit podle [6]:

- Objemu tlakové nádoby.
- Konstrukčního řešení.
- Chemického složení a vlastnostech pracovního média.
- Technologických a fyzikálně-chemických vlastností materiálu.
- Způsob výroby.
- Požadavky na provoz, umístění venku nebo vevnitř.

Na svařované části tlakového zařízení je možné použít jen takový přídavný materiál, který lze svařovat podle předepsaných norem.

2.4 Požadavky na materiály používané na tlakové části průmyslových potrubí

Materiály musí splňovat podmínky dle EN 10204, se zařazením do skupin v souladu s TNI CEN ISO TR 15608. Minimální tažnost použitých ocelí pro potrubí musí být 14 % v příčném směru a 16 % v podélném směru. Spojovací části nebo odlitky mohou dosáhnout i nižších hodnot tažnosti při použití vyššího součinitele bezpečnosti nebo při provedení vhodné destrukční zkoušky k prokázání tvárného chování materiálu.

Minimální hodnota nárazové práce (V-vrub) musí být 27 J u feritických ocelí a ocelí legovaných 1,5 % až 5 % Ni a 40 J u ocelí skupin 8, 9.3 a 10 (dle TNI CEN ISO TR 15608) při zkušební teplotě vždy nižší než 20°C, přesněji definované v příloze B této normy. V tabulce 4.1-1 této normy je uvedeno chemické složení ocelí určených pro tváření nebo svařování. [6]

2.5 Hlavní požadavky kladené na tlakové části

- Materiály musí být certifikovány dle EN 10204 a zařazeny do svařovacích skupin.
- Součásti nesmí projevovat žádné známky povrchových ani vnitřních vad.
- Minimální hodnota nárazové práce (u V-vrubu) musí mít hodnotu 27 J u feritických ocelí a ocelí legovaných 1,5 % - 5 % niklu při zkušební teplotě nižší než je 20°C.

Volba konstrukčního materiálu závisí především na korozních vlastnostech, charakteru procesního média a pracovních podmínkách, převážně však tlaku a teplotě.

[6]

Tab. 1: Předepsaný maximální obsah prvků v ocelích určených pro svařování a tváření [6]:

Oceli:	Maximální obsah prvků v rozboru tavby [hm.%]:		
	C	P	S
Feritické korozi-vzdorné oceli	0,08	0,04	0,015
Martenzitické korozi-vzdorné oceli	0,06	0,04	0,015
Austenitické korozi-vzdorné oceli	0,08	0,045	0,015
Austeniticko- feritické korozi-vzdorné oceli	0,030	0,035	0,015

3 Návrh základního materiálu tepelného výměníku

Jako základní materiál byla navržena austenitická ocel s označením 1.4541 dle jednotlivých norem (viz tab. 2) a chemických složením (tab. 3).

Tab. 2: Označení oceli 1.4541 dle jednotlivých norem [12]

AISI (USA)	W.Nr.	DIN	EN (EU)	ČSN
321	1.4541	X6CrNiTi 18-10	X6CrNiTi 18-10	17 248

Tab. 3: Chemické složení oceli 1.454 [12]

Chemické složení oceli [hm. %]:									
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Ti
0,08	1,0	2,0	0,045	0,03	19	0	12	0	0,7

Tab. 4: Mechanické oceli 1.4541 [12]

Mechanické vlastnosti oceli 1.4541			
Mez pevnosti Rm [MPa] :	Mez kluzu Re [MPa] :	Tažnost [50%] :	Tvrdost [HB]:
540-740	230	43	88

3.1 Charakteristika základního materiálu

Navržený základní materiál je austenitická—ocel stabilizovaná titanem. Austenitické oceli mají velkou využitelnost v různých odvětvích, nejvíce však chemický a potravinářský průmysl.

Tento druh ocelí je nejlepší volbou z důvodu několika možností dalšího zpracování s využitím jejich vhodných mechanických vlastností a odolnosti proti korozi. Austenitické oceli většinou obsahují méně než 0,1 % uhlíku, což je důležitá vlastnost, která souvisí s dobrou svařitelností. Dále obsahují 16-22 % chromu, 8-40 % niklu, 0-5 % molybdenu, případně titan, měď nebo křemík. [12]

Austenitickou strukturu zajišťují austenitovorné prvky jako nikl, mangan, uhlík a dusík. Oceli mají nízkou mez kluzu od 200 do 300 MPa, ale vysokou houževnatost a jsou odolné proti mezikrystalické korozi. Austenitické oceli jsou běžně nemagnetické, ale mohou obsahovat malé množství feritu, díky kterému může dojít ke slabému magnetismu. K vysoké korozní odolnosti přispívá z velké části chrom, molybden, měď, křemík a nikl.

Ocel je schválena pro použití na tlaková zařízení do teploty 400°C a lze ji svařovat pomocí elektrického oblouku při použití všech metod svařování. Ocel nelze použít v případě, že je na zařízení nebo součásti požadován vysoký lesk, z důvodu obsahu titanu. Materiál je vhodný pro hluboké tažení a zakružování, na druhou stranu je hůře obrobitelný. [12]

3.2 Svařitelnost základního materiálu

Svařitelnost materiálu je schopnost vytvořit nerozebíratelné spojení požadovaných vlastností po celou dobu životnosti za působení tepla a tlaku.

Dobrou svařitelnost zajišťují: [1]

a) Vlastnosti základního svařovaného materiálu a svarového kovu.

- Chemické složení.
- Mechanické vlastnosti.
- Absorbce plynů.
- Chování za vysokých teplot.
- Chování při rychlém ohřevu.
- Chování při rychlém chládnutí.
- Náchylnost na vznik trhlin a další.

b) Použité metody svařování a výrobní podmínky.

- Tavné nebo tlakové svařování.
- Teplo vnesené do svarového spoje.
- Svařovací parametry.
- Tepelné zpracování.
- Provedení a pořadí svarů.

c) Konstrukce.

- Počet svarů.
- Typy použitých svarů.
- Umístění.
- Tloušťka svařovaného materiálu.

Toto velké množství parametrů naznačuje, že svařitelnost definuje jednotlivé vlivy: materiál, technologie a konstrukce.

Materiál svařitelný do určitého stupně při daném způsobu svařování a pro daný účel, pokud odpovídajícím technologickým postupem svařování dosahovat kovové celistvosti svarových spojů tak, že tyto spoje vyhovují technickým požadavkům, které se týkají, jak vlastností samotných spojů, tak i vlivu těchto spojů a konstrukční celek, jehož součástí jsou tyto spoje.

3.3 Vliv chemických prvků obsažených v oceli 1.4541 na její svařitelnost

Uhlík:

Vliv chemického složení oceli na její svařitelnost vyjadřujeme parametrem který se nazývá uhlíkový ekvivalent C_E , který vyjadřuje příspěvek jednotlivých legujících prvků ke kalitnosti oceli.

Uhlík obsahují všechny oceli, tedy i oceli korozivzdorné a má velký vliv na svařitelnost. Tento chemický prvek ovlivňuje především mechanické vlastnosti. Čím je vyšší obsah uhlíku, tím jsou vyšší mechanické vlastnosti jako R_e , R_m . Dále se snižují plastické vlastnosti jak nárazová práce (KCV) a tažnost (A_5). Dále se s rostoucím obsahem uhlíku zvyšuje tvrdost, která vzniká díky martenzitu, vyskytujícím se ve svarech při vyšších rychlostech ochlazování.

Křehká zakalená sktruktura v podobě martenzitu nebo spodního bainitu je v tepelně ovlivněné oblasti svarového spoje a ve svarovém spoji nežádoucí, v případě vzniku těchto struktur se ocel velmi špatně svařuje. Uhlíkový ekvivalent C_E je tedy významným ukazatelem svařitelnosti oceli ze strany jejího chemického složení. [2,3]

Křemík:

Křemík je chemický prvek, který silně zbavuje materiál oxidů. Nedostatek křemíku způsobuje to, že je ocel neuklidněná. Neuklidněná ocel je nevhodná pro namáhané konstrukce. Hlavní nevýhodou neuklidněné oceli je vznik nerovnoměrného chemického složení, zejména však uhlíku a síry. [1]

Mangan:

Mangan zvyšuje mechanické vlastnosti jakou je mez kluzu a mez pevnosti. Zvýšení mechanických vlastností dosahuje aniž by byly sníženy plastické vlastnosti. Působí jako desoxidační prvek a společně s křemíkem se využívá při výrobě neuklidněných ocelí. Mangan má schopnost na sebe vázat mangan za zniku MnS. [1,2]

Síra:

Je přidávána převážně do nelegovaných ocelí pro zlepšení obrobiteľnosti. Je-li obsah síry vysoký, dochází při svařování k natavení eutektika na hranicích zrn a tím vznikne porušení materiálu. Vysoký obsah síry způsobuje vznik nežádoucích lamelárních trhlin.

Nikl:

Nikl se přidává do ocelí a svarového kovu za účelem zlepšení jejich plastických vlastností, převážně za nízkých teplot a pro zvýšení prokalitelnosti. Vysokolegovaným austenitickým ocelím zajišťuje spolu s ostatními austenitotvornými prvky austenitickou mikrostrukturu.

Chrom, Molybden, Vanad:

Jsou to chemické prvky, vytvářející karbidy, které precipitací $Cr_{23}C_6$ a Cr_7C_3 , výrazně precipitačně zpevňují ocel i svarový kov. Rozpustí-li se molybden v tuhém roztoku, je schopen přispět k substitučnímu zpevnění materiálu. Hlavní výhodou přítomnosti chromu je odolnost proti korozi. Tyto legující prvky způsobí zvýšení požadovaných teplot předehřevu pro zabránění vzniku studených trhlin ve svarovém kovu. [1,2]

3.4 Svařování vysokolegovaných ocelí

Mezi korozivzdorné oceli řadíme oceli, které odolávají elektrochemické korozi v oxidačním prostředí. Korozivzdorné oceli odolávají oxidačnímu prostředí a chemické korozi v plynech při teplotách nad 600°C. Legující prvky jako například chrom a křemík jsou schopny na povrchu oceli vytvořit při vyšších teplotách odolnou, stabilní vrstvu oxidů Cr_2O_3 a SiO_2 .

Legury Cr, V, Mo, W, Nb, Ti zajišťují žárupevné vlastnosti tím, že výrazně zpomalují degradaci mechanických vlastností při zvýšených teplotách a dále výrazně zpevňují tuhý roztok disperzními precipitáty. [1]

Nejdůležitější legující prvky rozdělujeme do dvou skupin :

1. Austenitotvorné, které rozšiřují v rovnovážném diagramu oblast

γ : C, Ni, Cu, Mn, N

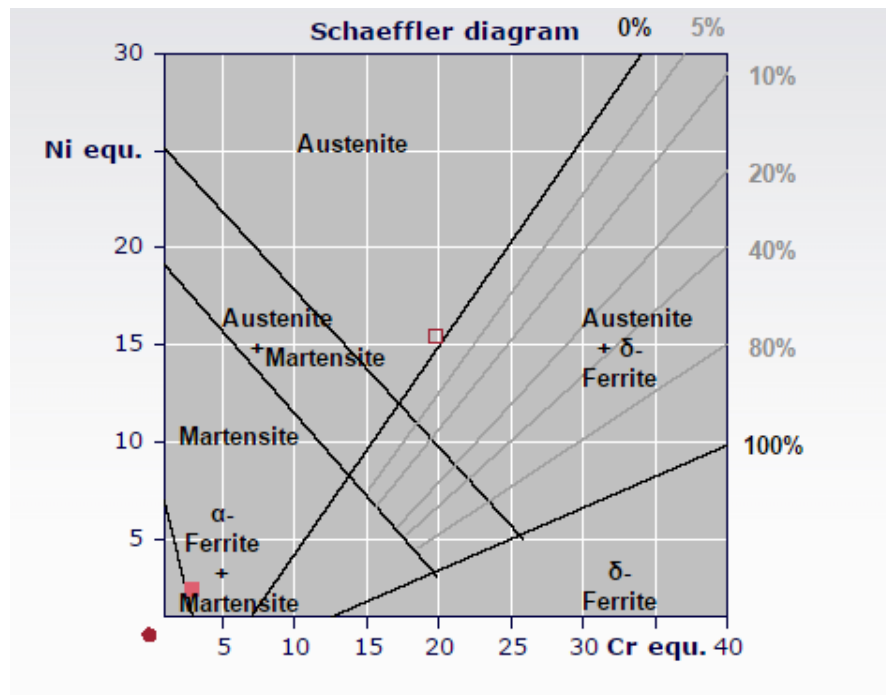
2. Feritotvorné, které zužují v rovnovážném diagramu oblast

γ : Cr, Mo, Si, Al, W, Ti, Nb, V

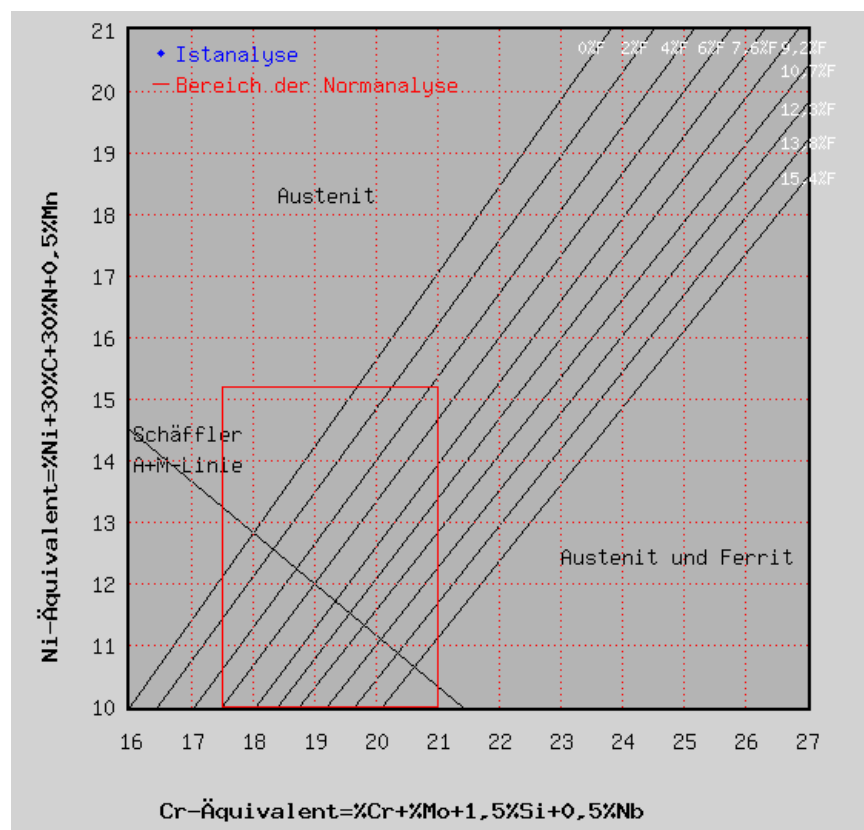
3.5 Struktura vysokolegovaných ocelí

Struktura vysokolegovaných korozivzdorných ocelí závisí převážně na jejich chemickém složení. Oceli s obsahem chromu nad 5 hmotnostních % jsou samokalitelné. Chrom významně snižuje kritickou rychlost ochlazování pro vznik martenzitu. Díky tomu se výrazně posouvá křivka uhlíku v ARA diagramu. Toto způsobuje, že i při ochlazování vzniká u korozivzdorných ocelí s obsahem chromu do rozsahu oblasti γ martenzitická struktura. Použitím niklu jako dalšího legujícího prvku lze dosáhnout větší korozní odolnosti a větší houževnatosti ocelí. Zlepšení těchto vlastností je způsobeno austenitickou strukturou chrom-niklových ocelí. [12]

Důležitou vlastností austenitu je vysoká rozpustnost uhlíku a také se vyznačuje lepší plasticitou v porovnání s feritem. Díky vyšší rozpustnosti uhlíku v austenitu lze eliminovat nebezpečí vzniku precipitace karbidů chromu. Výsledkem kombinace feritotvorných a austenitotvorných prvků na strukturu oceli je chrom-niklová struktura. Všechny prvky, které ocel obsahuje jsou vyjádřeny tzv. ekvivalentem. Všechny austenitotvorné prvky vyjadřuje ekvivalent niklu Ni_E a všechny feritotvorné prvky jsou vyjádřeny ekvivalentem chromu Cr_E . Tyto ekvivalenty vytváří dva diagramy, které s používají k zjištění výsledné chrom-niklové struktury austenitických ocelí. Tyto dva diagramy se nazývají Schaefflerův a De Longův. [1]



Obr. 5: Schaefflerův diagram oceli 1.4541 [5]:



Obr. 6: De Longův diagram oceli 1.4541 [4]:

Schaefflerův diagram se používá k detekci výsledné mikrostruktury chrom-niklových austenitických ocelí s nízkým obsahem dusíku, zatímco De Longův složí pouze pro upřesnění Schaefflerova diagramu. V ekvivalentu niklu Ni_E je obsažen i dusík jako významný austenitotvorný prvek, který má koeficient 30. Z tohoto důvodu je možné De Longův diagram použít i pro austenitické chrom-niklové oceli s dusíkem. S určitou přesností lze detekovat mikrostrukturu chrom-niklových austenitických ocelí s obsahem feritu od 0 do 15 %, proto není vhodné jeho použití pro oceli s vysokým obsahem manganu. Obsahy feritu obvykle odpovídají ocelím s jedním procentem manganu.

Ani jeden v výše zmíněných diagramů nelze použít k odhadu mikrostruktury chrom-niklových ocelí s vyšším podílem feritu ve struktuře, převážně u feriticko-austenitických duplexních ocelí. Z tohoto důvodu byl vytvořen nový diagram s názvem WRC, který umožňuje spolehlivou detekci obsahu feritu ve struktuře chrom-niklových ocelí ve vyšším rozsahu. [1]

Uvedené diagramy lze použít k odhadům obsahu feritu a austenitu nejen v základním materiálu, ale i ve svarovém kovu. V případě, že detekujeme obsah feritu je nutné vzít v úvahu stupeň promísení svarového kovu nataveného z přídavného materiálu se základním materiálem, jež je závislý na svařovacích parametrech a použité technologii.

3.6 Svařitelnost Austenitických Cr-Ni ocelí

Austenitické oceli se velmi liší od feritických ocelí několika důležitými faktory. Oproti feritickým ocelím mají o 50 % větší tepelnou roztažnost a o 30 % nižší tepelnou vodivost. V průběhu svařování se tyto odlišnosti projeví vznikem větších deformací a zvýšeném napětí v porovnání s feritickými oceli. Díky austenitické struktuře je ocel lépe tažná a houževnatá oproti uhlíkovým a nízkolegovaným ocelím. [1,12]

3.7 Hlavní činitelé ovlivňující svařitelnost austenitických korozivzdorných ocelí.

3.7.1 Teplé krystalizační trhliny

Vady svarového spoje jako teplé krystalizační trhliny vznikají pouze ve svarovém kovu, zatímco polygonizační a likvační vznikají jak ve svarovém kovu, tak v tepelně ovlivněné oblasti. Teplé krystalizační trhliny se objevují převážně při tuhnutí svarového kovu okolo teploty solidu. Jsou někdy velmi hluboké a mohou výrazně snížit únosnost spoje. Po úpravě svaru se vyskytují na povrchu svaru a často jsou dobře vizuálně detekovatelné.

Za vysokých teplot, těsně pod teplotou solidu je technologická pevnost svarového kovu velmi malá a za těchto teplot není kov schopen pracovat s tahovým napětím vznikajícím při jeho ochlazování. Vznik teplých trhlin je podmíněn přítomností prvků jako S, P, Si, Ti, Nb, které při tuhnutí svarového kovu zapříčiňují snížení plastických vlastností v mezidendritických prostorech, nebo vytvářejí s železem a niklem nízkotavitelné eutektikum, které snižuje pevnost nahanicích zrn, převážně však vysoký obsah síry zapříčiňuje vznik krystalizačních trhlin. Hlavním parametrem pro snížení náchylnosti austenitických korozivzdorných ocelí ke vzniku teplých trhlin je obsah delta feritu ve struktuře. [1]

Norma ČSN EN 1011-3 doporučuje několik opatření pro snížení teplých krystalizačních trhlin [1]:

- Pro svařování používat přídavné materiály o vysoké čistotě a vyšším obsahem manganu.
- Používat nižší rychlosti svařování.
- Dodržovat poměr šířky a výšky svarové lázně kolem 1 – 1,5.
- Svařovat s nízkým tepelným příkonem.
- Svarovou lázeň udržovat co nejužší.
- Mezihausenková teplota nesmí přesáhnout 150°C.

Austenitická ocel 1.4541 je odolná vůči krystalizačním trhlinám za horka. Vznik těchto trhlin nelze předpokládat i u jiných austenitických ocelí podobného chemického složení např. 1.4401, 1.4404, 1. 4571 a další.

3.7.2 Mezikrystalová koroze

Mezikrystalová koroze představuje vliv změny struktury materiálu na jeho korozní odolnost. Hlavní příčinou tohoto jevu je nestejnorodost kovu na hranicích zrn. Kov, který má tendenci korodovat mezikrystalově ztrácí svou mechanickou pevnost, aniž by došlo k vizuální změně. Mezikrystalová koroze se projeví na zcitlivěné korozivzdorné oceli převážně v agresivním prostředí, které má oxidační potenciál v oblasti pasivity struktury austenitické korozivzdorné oceli a aktivního kovu s nízkým obsahem chromu. Tato koroze probíhá nejrychleji v případě, že už nastala koroze ochuzené části kovu v aktivním stavu, zatímco ostatní povrch je pasivní. Za určitých podmínek totiž přednostně koroduje v úzkém pásmu na hranici zrn, která postupně ztrácejí soudržnost. Austenitické chromové oceli jsou citlivé na vznik mezikrystalové koroze díky mechanismu, který se nazývá precipitace karbidů chromu. Precipitace je vylučování karbidů chromu z hranic zrn a z přilehlých oblastí. V případě, že dojde k precipitaci pod minimální mez, může dojít ke vzniku koroze. Mezikrystalová koroze nastává v tzv. pásmu zcitlivění, objevujícím se při teplotách asi 420-820 °C. Uhlík v celkovém chemickém složení nemá na mezikrystalovou korozi žádný vliv, pokud není jeho obsah vyšší jak 0,03 %. Snížením obsahu uhlíku dosáhneme posunu C-křivky k delšímu času pro tepelné zpracování. Přesáhne-li doba nutná pro zcitlivění při kritické teplotě asi hodinu, pak bylo výrazně eliminováno nebezpečí zcitlivění při svařování. Existuje ochrana proti vzniku mezikrystalové koroze tzv. stabilizací stabilizačními prvky jakou jsou titan nebo niob.

Obsah přidaného stabilizačního prvku závisí na obsahu uhlíku, používá se nejméně čtyřnásobné množství titanu k uhlíku. [1,2]

Existují různé teorie proč mezikrystalová koroze vzniká:

- a) Teorie ochuzení.
- b) Teorie pnutí.
- c) Teorie článků.

Podle teorie ochuzení dochází k mezikrystalové korozi snížením obsahu chromu v okolí vylučujících karbidů a nitridů chromu. Proces samovolného rozptylování částic uhlíku a dusíku neboli-li difuze těchto prvků k hranicím zrn probíhá výrazně rychleji než difuze chromu. Uhlík, který je třeba k tvorbě karbidů difunduje na hranice zrn i ze samotného zrna, ale chrom pochází zprvu jen z okraje austenitických zrn. Obsah chromu v povrchové vrstvě na hranicích zrn výrazně klesá vyloučením karbidů tak, že tato vrstva už není schopna pasivace neboli tvorby ochranné vrstvy a podléhá korozi. Tato skutečnost tedy nasvědčuje tomu, že náchylnost k mezikrystalické korozi je způsobena místům, jež jsou ochuzena o chrom, který klesl pod hranici 12 %. [1]

Teorie pnutí vysvětluje vznikající značné vnitřní pnutí v místech, kde se začíná vylučovat a postupně roste druhé fáze. To je důvod, proč vzniknou ve struktuře oceli velké energetické rozdíly, které zapříčiňují zhoršenou pasivaci hranic zrn.

Následující teorie mikročlánků říká, že ušlechtilé nitridy představují katodu a blízké okolí kovu je anoda. Na hranici mezi karbidy a základním kovem je článek, jež v okolí karbidů velmi koroduje, i v případě tepelného zpracování. [1]

Výše uvedená fakta jen dokazují skutečnost, že zvýšit odolnost mezikrystalové koroze austenitických ocelí lze zabráněním vzniku precipitace důležitých karbidů chromu, která je závislá na chemickém složení oceli, stabilizaci oceli, tepelném zpracování a dalších důležitých parametrech.

3.7.3 Chemické složení

Hlavní problém způsobuje uhlík, protože umožňuje vznik karbidů na hranicích zrn a tím způsobuje zcitlivění austenitické oceli a hlavně mezikrystalovou korozi. Řešením tohoto problému je snížení obsahu uhlíku pod úroveň 0,03 %, kde už nemůže mezikrystalová koroze vzniknout. [1,2]

3.7.4 Vliv stabilizačních prvků

Snížení obsahu uhlíku pod 0,03 % představuje složitou operaci, jsou možnosti jak tuto operaci zjednodušit. Například se přidávají do austenitických ocelí prvky a větší

afinitou k uhlíku než chrom. Tyto prvky jsou titan nebo niob, vytvářející důležité karbidy titanu TiC a niobu NbC, čímž dojde k znemožnění vzniku karbidů chromu a tím zabrání ochuzení hranic o chrom. Podmínkou bezproblémové stabilizace je minimální poměr mezi obsahem uhlíku a stabilizačním prvkem. [1]

$$\frac{Nb}{C} \geq 8 \qquad \frac{Ti}{C} \geq 4$$

$$\frac{Ta+Nb}{C} \geq 8 \qquad \frac{Ta}{C} \geq 16$$

Svarový kov by měl být dolegován přídavným materiálem s obsahem niobu, jako prvkem, který umožňuje stabilizaci. Legující prvek titan je znám vysokou afinitou ke kyslíku, proto v průběhu svařování více vyhořívá. [1]

Je třeba zdůraznit skutečnost, že stabilizace austenitických ocelí zamezuje vzniku mezikrystalické koroze při již zmiňovaných teplotách zcitlivění 420 až 800 °C. Koroze je schopna přemístění do pásma přehřátí tepelně ovlivněné oblasti, kde se nachází oxidační korozní prostředí a hrozí zde nebezpečí vzniku nožové koroze. Tato skutečnost dokazuje, že je výhodnější použití materiálů s nízkým obsahem uhlíku a dusíku. [1]

3.7.5 Vliv tepelného zpracování

Pokud je austenitická korozivzdorná ocel přivedena k teplotě nad 950 °C, je schopna pomalu rozpouštět vyprecipitovaný karbid chromu a díky prudkému ochlazení ze zmíněné teploty můžeme ocel udržet ve stavu austenitu. Pokud to dovolují vlastnosti materiálu, je možné použít i žíhací teplotu nad 1050 °C, která umožňuje urychlení rozpouštění karbidu a následující rychlé ochlazení zabrání precipitaci, čímž se svarový spoj stane odolným (necitlivým) vůči mezikrystalické korozi. Toto žíhání při vyšší teplotě, kde je urychleno rozpouštění karbidů se nazývá rozpouštěcí.

Nejlepší variantou dokonalého tepelného zpracování austenitických stabilizovaných ocelí je rozpouštěcí žíhání.

Rozpouštěcí žíhání je tepelné zpracování, spočívající v ohřevu na rozpouštěcí teplotu teplotu karbidů austenitických ocelí a výdrží na teplotě do 20 minut s následným rychlým ochlazením na okolní teplotu. Hlavním účelem rozpouštěcího žíhání je získat pouze austenitickou strukturu odolnou mezikrystalové korozi. Uvolňující se uhlík z vazby karbidů chromu při teplotě rozpouštěcího žíhání dovoluje jeho vazbu na karbidy stabilizačních prvků. Toto je možné jen při následujícím stabilizačním žíhání při teplotě 900°C po určitou dobu. Tento druh tepelného zpracování nevyvolá precipitaci karbidů chromu, ale jen drobných karbidů titanu nebo niobu v celém objektu zrn. [3]

4 Experimentální část práce

V experimentální části práce je proveden rozbor svarových spojů tepelného výměníku a popis jejich provedení. Následující část obsahuje technologický postup výroby tohoto zařízení. Závěrečná část popisuje schválení postupu svařování a způsoby zkoušení svarových spojů.

4.1 Návrh svarových spojů pláště tepelného výměníku

4.1.1 Podélný svar zakruženého lubu

Tento svarový spoj zajišťuje svařovací automat Fronius technologií 135 (MAG). Nejdříve však bylo nutné provést stehování ruční metodou obloukového svařování 141 (TIG).

Pro vytvoření stehů podélného svaru byla použita metoda 141 (TIG). Dále byl jako přídavný materiál použit drát s označením OK Tigrod 318Si. Drát má nízký obsah uhlíku, je stabilizovaný niobem a je určen pro svařování korozivzdorných ocelí, které jsou stabilizovány prvky niobem nebo titanem.

Tab. 5: Chemické složení přídavného materiálu [9]:

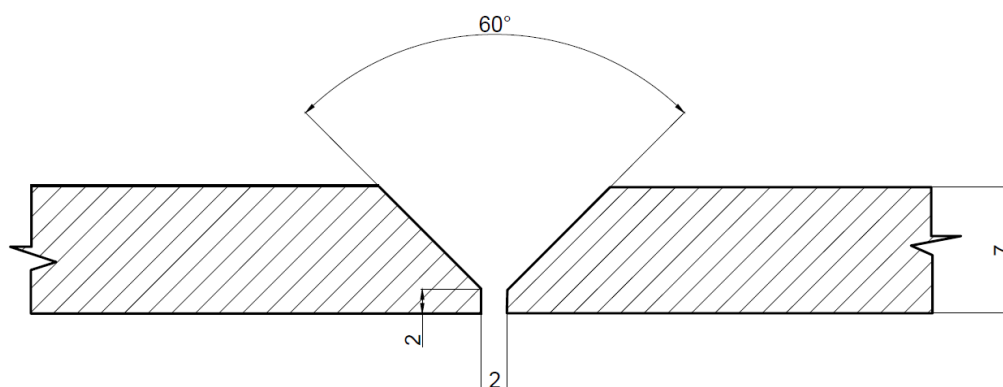
Chemické složení přídavného materiálu OK Tigrod 318Si [hm.%]:						
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Nb
0,08 <	0,8	1,8	19	12,5	2,8	<1,0

Tab. 6: Mechanické vlastnosti přídavného materiálu [9]:

Mechanické vlastnosti čistého svarového kovu:			
R _m [MPa]:	Re [MPa]:	A ₅ [%]:	KV [J/ °C]:
650	460	35	40

Tab. 7: Svařovací parametry prostehování pláště

Návrh svařovacích parametrů pro stehování:			
Proud [A]:	Napětí [V]:	Rychlost svařování [mm/min]:	Průměr přídavného drátu [mm]:
120	20	150	2



Obr.7: Úprava svarových ploch

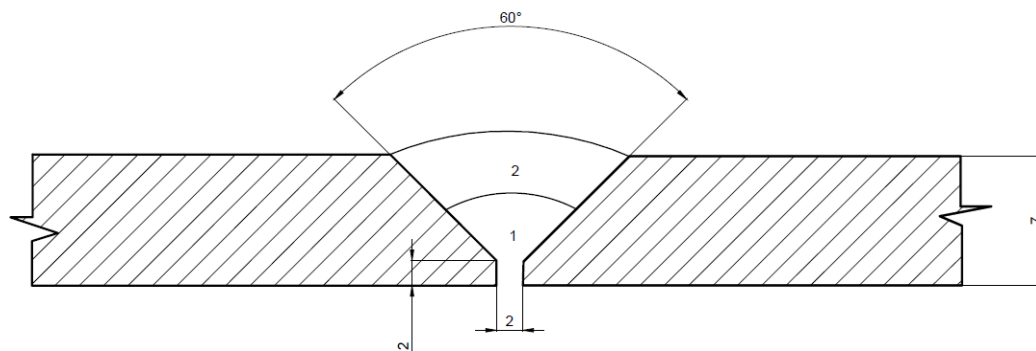
Svařovací parametry pro podélný svar byly navrženy tak, aby odpovídaly použité metodě svařování, tloušťce a chemickým a mechanickým vlastnostem základního materiálu. Dále byly parametry svařování odzkoušeny a zpracovány ve formě WPS. Pro podélný spoj byl použit svařovací drát Ok Autrod 318Si, což je materiál určen pro svařování korozivzdorných stabilizovaných ocelí, vhodný pro zařízení pracující v chemickém průmyslu za vyšších teplot.

Tab. 8: Chemické složení použitého přídavného materiálu [9]

Chemické složení přídavného materiálu Ok Autrod 318Si [hm.%]:						
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Nb
<0,08	0,8	1,7	19	12,5	2,8	<1,0

Tab. 9: Typické mechanické vlastnosti přídavného materiálu [9]

Mechanické vlastnosti přídavného materiálu:			
R _m [MPa]:	R _e [MPa]:	A ₅ [%]:	KV [J/ °C]:
615	460	35	100



Obr.8: Postup svařování.

Po úpravě svarových ploch byl zakroužený plech podélně zavařen ve dvou vrstvách za použití následujících svařovacích parametrů.

Tab. 10: Svařovací parametry podélného svaru

Návrh svařovacích parametrů pro automat:			
Proud [A]:	Napětí [V]:	Rychlost svařování [mm/min]:	Průměr svařovacího drátu [mm]:
150	20	140	1

Výpočet množství tepla vneseného do svarového spoje:

Tab. 11: Svařovací parametry pro výpočet vneseného tepla

Parametry potřebné pro výpočet:			
I [A]:	U [V]:	v [mm × s ⁻¹]:	k :
150	20	2,33	0,8

$$Q = k \cdot \frac{U \cdot I}{v} \cdot 10^{-3} = 0,8 \cdot \frac{20 \cdot 150}{2,33} \cdot 10^{-3} = 1,03 \text{ KJ/mm}^{-1} \quad (3.1)$$

kde:

Q – množství tepla přivedeného do svaru na délkovou jednotku [KJ/mm]

I – svařovací proud [A]

U – svařovací napětí [V]

V – rychlost svařování [mm × s⁻¹]

k – koeficient tepelné účinnosti závislý na metodě svařování

Množství tepla přivedeného do svarového spoje vychází podle normy ČNS EN 1011-1 ze vztahu $\frac{q}{v}$, což znamená poměr mezi efektivním tepelným výkonem zdroje tepla při svařování a rychlosti svařování. [1]

Doporučené hodnoty koeficientu tepelné účinnosti (k) vybraných metod svařování udává následující tabulka.

Tab. 12: Koeficient tepelné účinnosti pro danou metodu svařování [1]

Označení svařovací metody:	Metoda svařování:	Koeficient tepelné účinnosti svařování (k):
121	svařování automatem pod tavidlem	1,0
111	ruční obloukové svařování obalenou elektrodou	0,8
114	ruční svařování plněnou elektrodou bez ochranné atmosféry	0,8
131	obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu, svařování MIG	0,8
135	obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu, svařování MAG	0,8
136	obloukové svařování tavidlem plněnou elektrodou v aktivním plynu	0,8
137	obloukové svařování tavidlem plněnou elektrodou v inertním plynu	0,8

138	obloukové svařování kovem plněnou elektrodou v aktivním plynu	0,8
139	obloukové svařování kovem plněnou elektrodou v inertním plynu	0,8
141	obloukové svařování netavicí se wolframovou elektrodou v atmosféře inertního plynu (WIG,TIG)	0,6
15	plazmové svařování	0,6

Při obvyklém způsobu je spoj po celou dobu svařovacího procesu pod vlivem vysokého proudu, což vede k vysokým hodnotám množství tepla přivedeného do svarového spoje. Příliš velké množství tepla vede k degradaci základního materiálu a celkově zhoršeným mechanickým vlastnostem provedeného svarového spoje. Z tohoto důvodu je nutné pečlivě volit svařovací parametry. Jeden z nejčastějších způsobů jak co nejvíce snížit množství tepla přivedeného do svarového spoje je použití tzv. pulsního proudu.

4.1.2 Obvodový svar

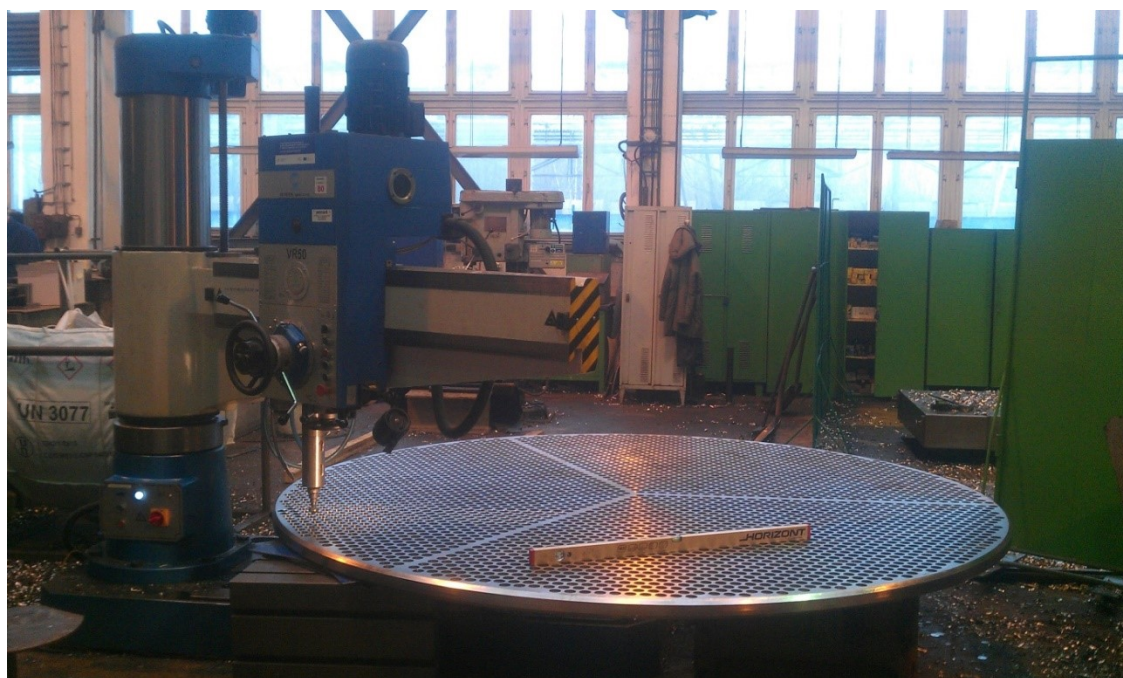
Následující svar zajišťuje spojení jednotlivých podélně svařených zakružených lubů. Tento jednostranný tupý svarový spoj je rovněž proveden technologií 135 (MAG) na automatu Fronius s obdobnými svařovacími parametry a stejným přídavným materiálem. Postup svařování udává schéma, viz obr.7, 8.

Tab.11 : Svařovací parametry pro obvodový svar

Návrh svařovacích parametrů pro automat:			
Proud [A]:	Napětí [V]:	Rychlost svařování [mm/min]:	Průměr svařovacího drátu [mm]:
160	25	150	1

4.1.3 Svarový spoj trubka – trubkovnice

K tomuto svarovému spoji byla použita metoda 141 (TIG) orbitálním způsobem svařování. Orbitální svařování lze považovat za velmi vhodnou, přesnou a produktivní metodu svařování. Proto byla použita pro vytvoření spoje trubka – trubkovnice. Jde o automatizovaný proces, kde orbitální svařovací hlava vyžaduje jednoduchou obsluhu. Vlivem ručního vedení svařovacího zařízení dochází ke nepřesnostem, rozdílné rychlosti svařování a délce oblouku. V případě použití orbitálního zařízení lze tyto nedostatky eliminovat. Orbitální svařovací zařízení vyžaduje pouze nastavení svařovacích parametrů a upevnění svařovací hlavy pomocí trnů.



Obr.9: Trubkovnice.

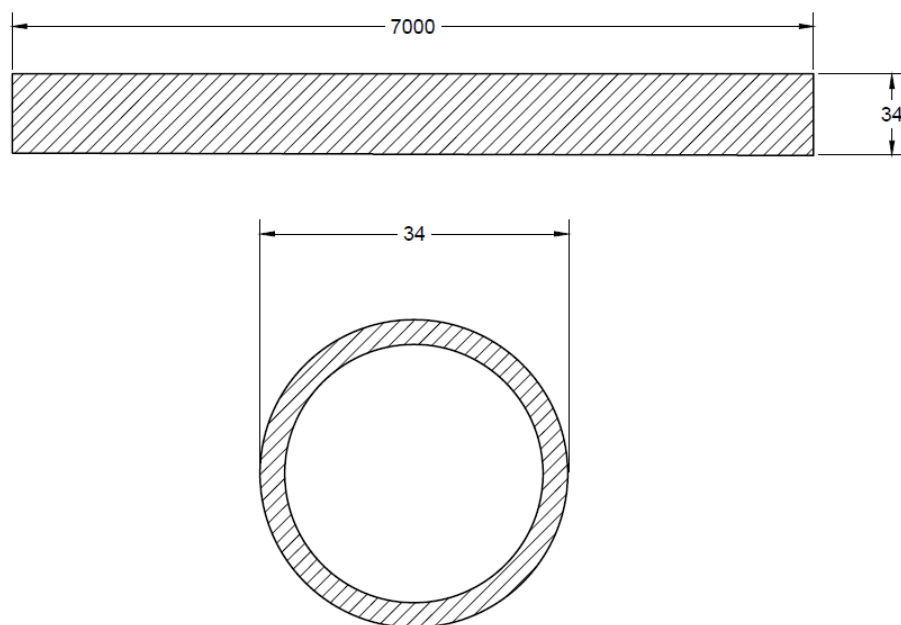
Materiál trubek s označením 1.4301 je korozivzdorná ocel s chemickým složením uvedeným v tab. 12.

Tab.12:Chemické složení materiálu trubky:

Chemické složení trubky [hm. %] :							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N
0,07	1	2	0,045	0,015	19	10	0,11

Tab.13: Způsoby značení materiálu trubky:

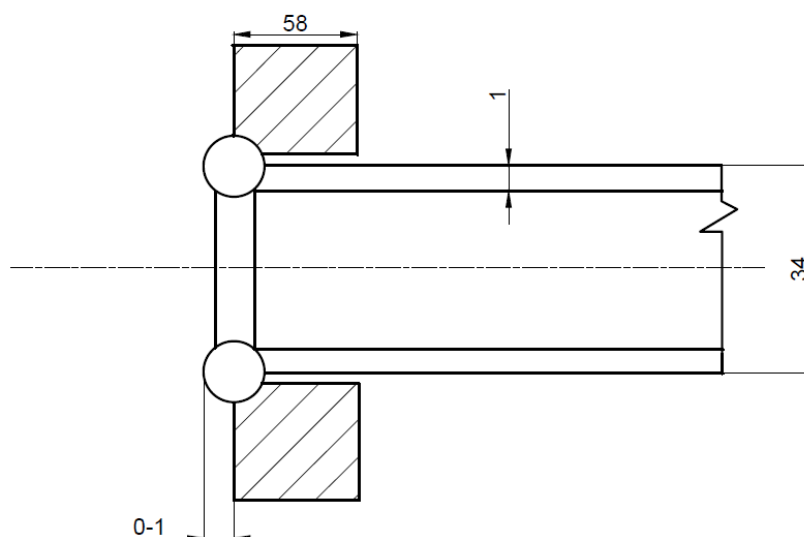
Označení oceli:				
AISI (USA)	W.Nr.	DIN	EN (EU)	ČSN
304	1.4301	X5CrNiTi 18-10	X5CrNiTi 18-10	17 240



Obr.9:Polotovar použité trubky

Zařízení pro orbitální svařování metodou 141 využívá při své činnosti pulsy. Vytvoření svarové lázně se dosahuje proudovými a napěťovými pulsy, které mají fáze na stejném poměru jako pulsní frekvence. Velikost elektrického oblouku se mění mezi

pulsy základního a pulsního proudu. Hlavní výhodou je kontrolované natavení materiálu a nízké tepelné namáhání okolí svaru díky nízké hodnotě základního proudu.



Obr.10:Svar trubka-trubkovnice.

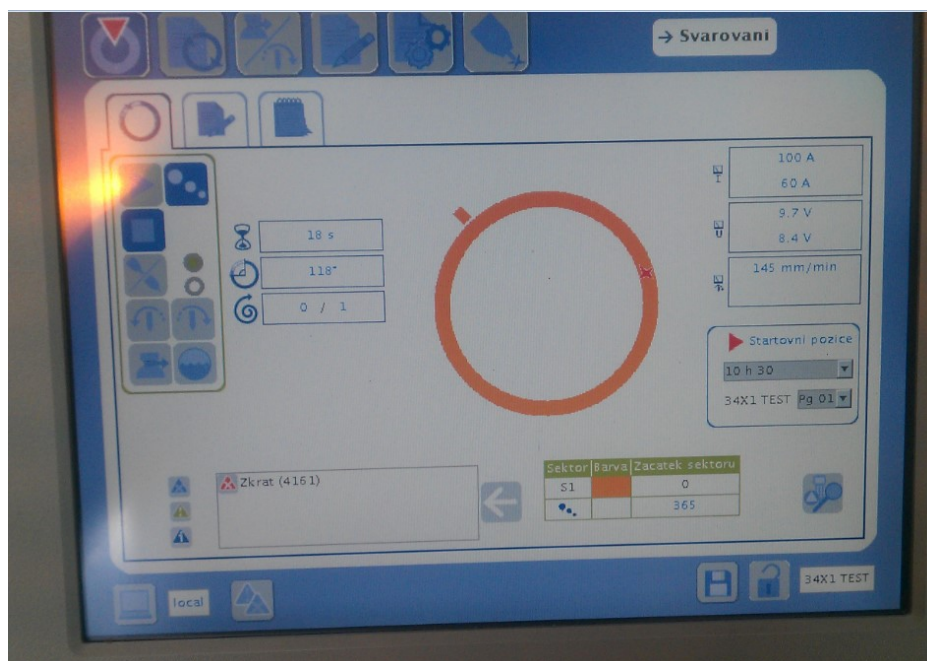
Svar metodou 141 byl proveden bez použití přídavného materiálu. Wolframová elektroda použitá v tomto spoji s označením WC 20 o průměru 1mm je cerová, univerzální pro střídavý i stejnosměrný proud. V průběhu svařování byl použit inertní plyn Argon o čistotě 4,6 , aby byl svar chráněn před okolní atmosférou a wolframová elektroda před poškozením. [10]

Tab.14: Návrh svařovacích parametrů pro spoj trubka-trubkovnice.

Návrh svařovacích parametrů:			
Proud [A]:	Napětí [V]:	Rychlost svařování [mm/min]:	Průměr elektrody: [mm]
60, 100	9, 10.5	145	1

Tepelný výměník obsahuje 3522 děr, je tedy třeba provést velké množství svarových spojů orbitálním způsobem. Orbitální zařízení vytvoří spoj mezi trubkou a trubkovnicí po celém obvodu, ale z důvody vyšší kvality svarového spoje je třeba

naprogramovat přejezd startovní pozice elektrody. Dráha wolframové elektrody tedy odpovídá 365 °.



Obr.11: Nastavené parametry na orbitálním svařovacím zařízení.

Výpočet množství vneseného tepla do svaru trubka-trubkovnice

Tab. 15: Hodnoty základních svařovacích parametrů.

Základní svařovací parametry:			
I_b [A]:	U_b [V]:	v [$mm \cdot s^{-1}$]:	k:
60	9	2,41	0,6

Tab. 16: Hodnoty pulsních svařovacích parametrů.

Pulsní svařovací parametry:			
I_p [A]:	U_p [V]:	v [mm · s ⁻¹]:	k:
100	10,5	2,41	0,6

$$Q_{sp} = 0,6 \cdot \frac{U \cdot I}{v} \cdot 10^{-3} = 0,6 \cdot \frac{9 \cdot 60}{2,41} \cdot 10^{-3} = 0,134 \text{ KJ/mm}^{-1} \quad (3.2)$$

$$Q_{sp} = 0,6 \cdot \frac{U \cdot I}{v} \cdot 10^{-3} = 0,6 \cdot \frac{10,5 \cdot 100}{2,41} \cdot 10^{-3} = 0,261 \text{ KJ/mm}^{-1} \quad (3.3)$$

$$Q_s = \frac{Q_{sp} + Q_{sp}}{2} = \frac{0,134 + 0,261}{2} = 0,197 \text{ KJ/mm}^{-1} \quad (3.4)$$

4.2 Technologický postup výroby tepelného výměníku

Dělení materiálu:



Obr. 12: Použitý polotovar.

- Přemístit polotovar na pracovní plochu stříhacího zařízení.

- Stříhání dvou tabulí plechu o tloušťce 7 mm a rozměrech 2000 mm x 9000 mm na 2000 mm x 8790 mm.
- Stříhání tabule plechu z daného polotovaru o tloušťce 7 mm na rozměr 600 mm x 8790 mm.
- Stříhání tabule plechu o tloušťce 7 mm na rozměr 280 mm x 8790 mm.
- Dělení materiálu pro hrdla.
 - Stříhání tabule plechu o tloušťce 12 mm z polotovaru 2000 mm x 300 mm na 1910 mm x 250 mm.
 - Stříhání tabule plechu o tloušťce 14 mm z polotovaru 2900 mm x 300 mm na 2870 mm x 250 mm.
- Stříhání vzorků pro zkušební svary.
- Stříhání nájezdových a dojezdových desek pro automatizované svařování.

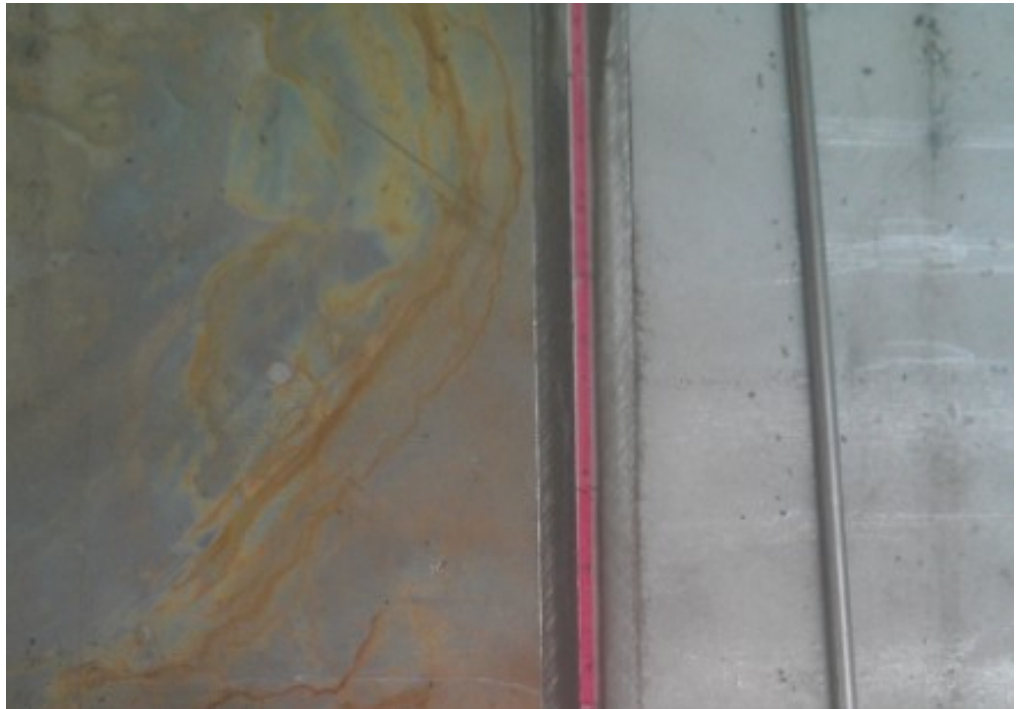


Obr.12: Hydraulické nůžky SBT 3010 [8]

Použitá technika: manipulační zařízení, jeřáb, hydraulické tabulové nůžky SBT 3010.

4.2.1 Úprava svarových ploch před svařováním

- Připravené tabule plechu umístit na pracovní plochu.
- Ze svarových ploch odstranit případnou korozi a zabrousit ostré hrany.
- Pro jednostranný V-svarový spoj vytvořit na všech kusech úkos 60°, viz obr. 7.
- Broušení po sražení hran.



Obr.13: Příprava pro jednostranný svarový V-spoj.

Použitá technika: jeřáb, manipulační zařízení, ruční úhlová bruska, vhodné měřidlo.

4.2.2 Zakružování děleného materiálu

- Označení jednotlivých lubů.
- Vizuální kontrola kvality povrchu.
- Brousit případnou korozi a ostré hrany.
- Upevnit do zakružovacího zařízení.
- Zakružování všech plechů o tloušťce 7 mm na průměr 2800 mm.



Obr.14: Zakružování. [5]

Použité nástroje: Jeřáb, úhlová bruska, zakružovací zařízení.

4.2.3 Příprava před svařováním

- Vizuální kontrola svarových ploch dle ČSN EN 970.
- Odmaštění svarových ploch vhodným rozpouštědlem.
- Dodržet odsazení 2 mm dle schématu viz. obr. 7.
- Provést kontrolu odsazení vhodným měřidlem.
- Stehování lubů metodou 141 (TIG).
- Stehování lubů o šířce 2000 mm ve čtyřech místech vždy po 500 mm.
 - Stehování ostatních lubů pouze ve dvou místech.
 - Při stehování dodržet svařovací parametry.
- Přivaření připravených nájezdových a dojezdových desek pro svařovací automat.



Obr.15: Nájezdová deska

Použité nástroje: Rozpouštědlo, úhlová bruska, distanční podložky pro vymezení vůle, posuvné měřítko, svařovací zařízení TIG, přídatný materiál OK Tigrod 318Si, nájezdové desky.

4.2.4 Svařování jednotlivých lubů

- Pomocí jeřábu připravené luby umístit na manipulátor.
- Nastavení svařovacích parametrů dle pokynů a WPS (kapitola 4.3.)
 - Svařovací proud: 160 A.
 - Svařovací napětí: 25 V.
 - Rychlost svařování: 150 mm/min.
 - Použít svařovací drát s označením OK Autrod 318Si průměru 1 mm.
- Provést svar na všech lubech ve dvou vrstvách podle schématu automatem Fronius metodou 135 (MAG) viz. obr.8.



Obr.16: Podélný svar na automatu Fronius. [5]



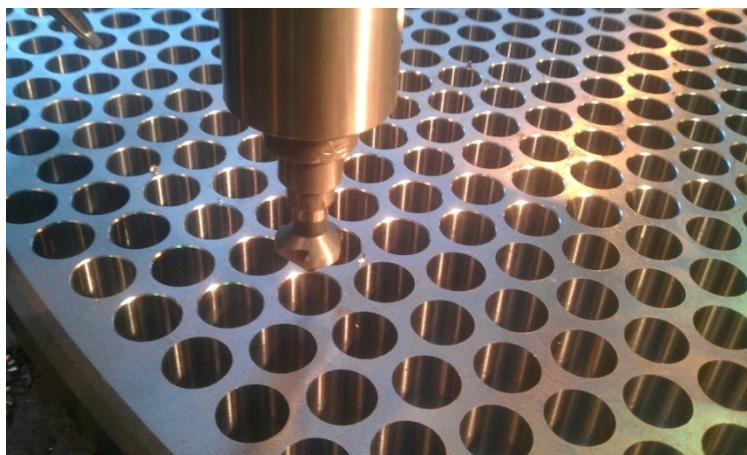
Obr.17: Automatické svařovací zařízení Fronius. [5]

- Svary začistit ocelovým kartáčem a úhlovou bruskou.
- Vyzít značku svářeče.
- Provést vizuální kontrolu pověřenou osobou.
- Provést kontrolu svaru certifikovanou osobou pomocí RTG.
- V případě zjištění vady použít ultrazvuk pro přesnou lokalizaci vady.
- Nalezené vady zabrousit a znovu provést svar v daném místě podle postupu oprav svarů.

Použité nástroje: jeřáb, manipulační zařízení, automat Fronius, úhlová bruska, ocelový kartáč, zařízení pro kontrolu kvality svaru.

4.2.5 Výroba trubkovnice

- Polotovar umístit na pracovní plochu obráběcího stroje.
- Obrábět na rozměr 2790 mm x 58 mm.
- Na polotovaru o průměru 2790 mm a tloušťce 58 mm srazit hranu a vytvořit úkos 60°.
- Vrtat otvory o průměru 35 mm na cnc řízeném vrtacím stroji.
- Kontrola všech rozměrů.
- Celkové broušení trubkovnice, odstranění ostrých hran.



Obr.18 : Vrtání otvorů



Obr.19 : CNC vrtací zařízení

Použité nástroje: jeřáb, obráběcí stroj, nástroje pro sražení hrany, vrtací zařízení řízené cnc, délková měřidla.

4.2.6 Kompletace pláště výměníku

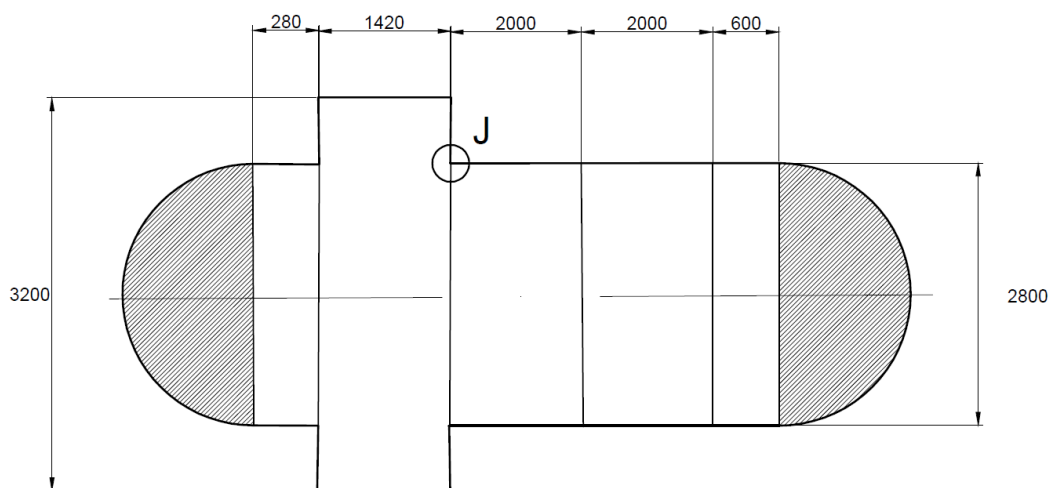
- Brousit hrany zakružených lubů.
- Vytvořit úkos 60° a provést odmaštění svarových ploch vhodným rozpouštědlem.
- Nastavení svařovacích parametrů dle WPS (kapitola 4.3.).
 - Proud [A]: 160.
 - Napětí [V]: 25.
 - Rychlost svařování [mm/min]: 150.
 - Průměr svařovacího drátu [mm]: 1.
 - Průtok ochranného plynu dle rychlosti svařování.
- Dodržet odsazení 2 mm a zajistit tuto polohu.
- Provést důkladnou kontrolu odsazení pomocí vhodného délkového měřidla.
- Ruční metodou 135 (MAG) stehovat luby v šesti místech vždy po 60°.
- Provést obvodové svary lubů podle schématu, viz. obr. 18.
- Podle detailu „J“ provést obvodový svar připraveného hrdla, upravujícího průměr výměníku, viz obr. 18, 19.
- Podle detailu „J“ provést spoj připravené součásti se zúžením na 2800 mm, viz. schéma na obr. 19.
- Svary brousit ocelovým kartáčem a úhlovou bruskou.
- Postupně provést vizuální kontrolu všech obvodových svarů.
- V případě zjištění vady použít ultrazvukové zařízení pro přesnou lokalizaci vady.
- Vadu přebrousit v délce 80 mm a provést opravu svaru.
- Do vnitřního prostoru výměníku umístit tyčové přípravky o délce vnitřního průměru výměníku pro zamezení deformace vlivem vlastní vysoké hmotnosti.

Konstrukce výměníku požaduje opatření, které zvýší pevnost celku a zamezí vzniku deformací vlivem vysoké hmotnosti a provozních podmínek. Z tohoto důvodu byly použity kruhové výztuhy umístěné vně výměníku.

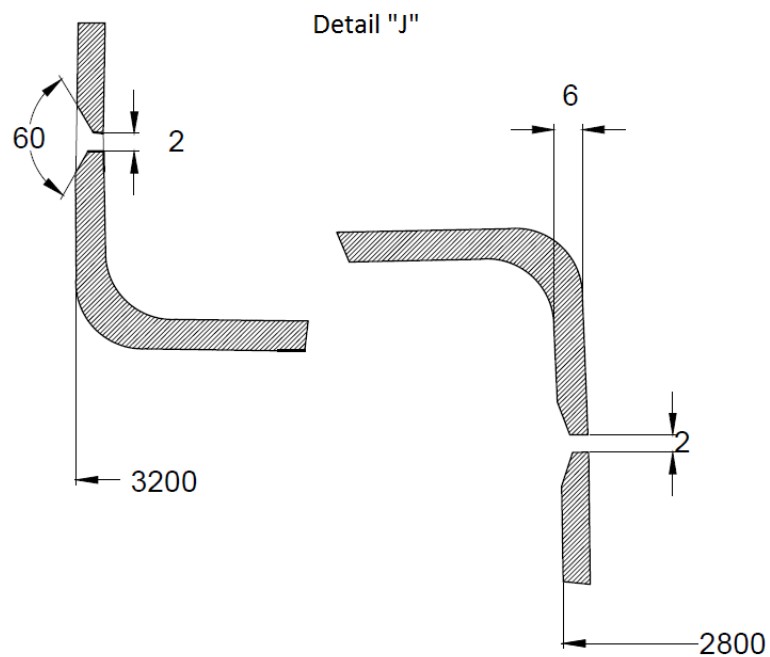
Všechny svarové spoje pláště výměníku jsou tupé (BW) ve tvaru V, se zkosením pod úhlem 60° a odsazením 2 mm, viz obr. 7,8.

Tab. 17: Návrh svařovacích parametrů pro automat Fronius dle WPS (kapitola 4.3.).

Návrh svařovacích parametrů pro automat:			
Proud [A]:	Napětí [V]:	Rychlost svařování [mm/min]:	Průměr svařovacího drátu [mm]:
160	25	150	1



Obr.20: Schéma rozměrů zakružených lubů.



Obr.21: Úprava svarových ploch podle výkresu.

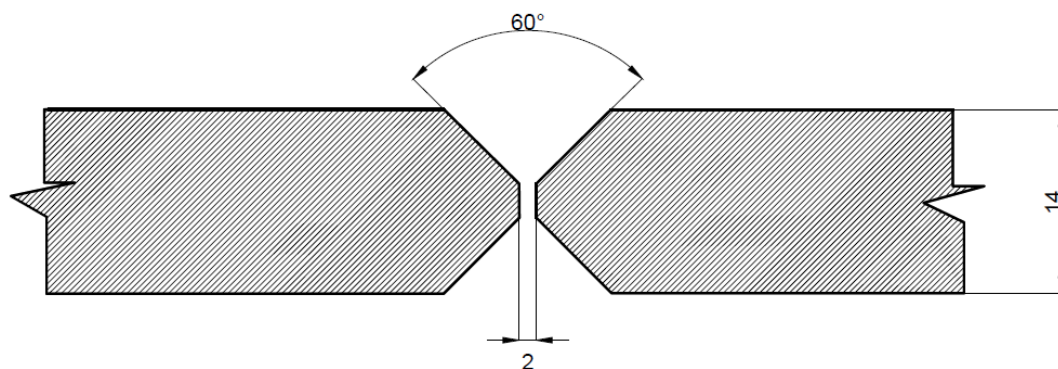


Obr.22: Detail obvodového svaru.

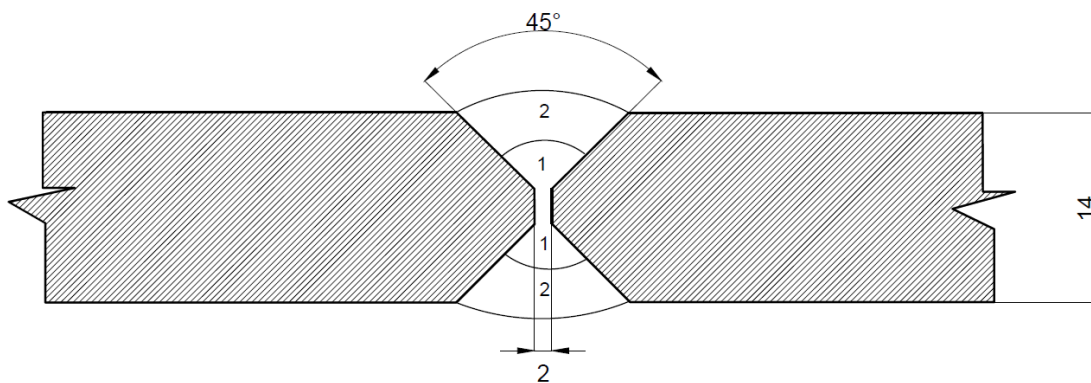
Použité nástroje: jeřáb, polohovadlo, ruční úhlová bruska, délková měřidla, přenosné svařovací zařízení 131 (MAG), svařovací automat Fronius, přídavný materiál.

4.2.7 Výroba a instalace hrdel

- Úprava svarových ploch dle schématu na obr.
 - Vytvořit pro oboustranný svarový spoj úkos 60°.
 - Brousit hrany.
- Zakružování plechů pro hrdla:
 - Zakružování plechu o tloušťce 14 mm na průměr 914 mm.
 - Zakružování plechu o tloušťce 12 mm na průměr 610 mm.
- Zvolit svařovací parametry pro metodu 135 (MAG).
 - Proud: 280 A.
 - Napětí: 30 V.
 - Rychlost svařování: 14 cm/min.
 - Průměr přídavného materiálu OK Autrod 318Si: 1,2 mm.
- Stehování metodou 135 (MAG).
- Provést oboustranný svarový spoj dle schématu na obr... ruční metodou svařování 135 (MAG) ve dvou vrstvách z každé strany.
- Zabrousit ostré hrany.
- Při stejných svařovacích parametrech provést svar hrdla a příruby.
- Na plášti výměníku vyřezat otvory.
 - Pro hrdlo N otvor o průměru 914 mm.
 - Pro hrdlo A otvor o průměru 610 mm.
- Otvory zabrousit a odstranit ostré hrany.
- Provést svar obvodu hrdla podle výkresu.



Obr.23 : Úprava svarových ploch pro hrdlo.

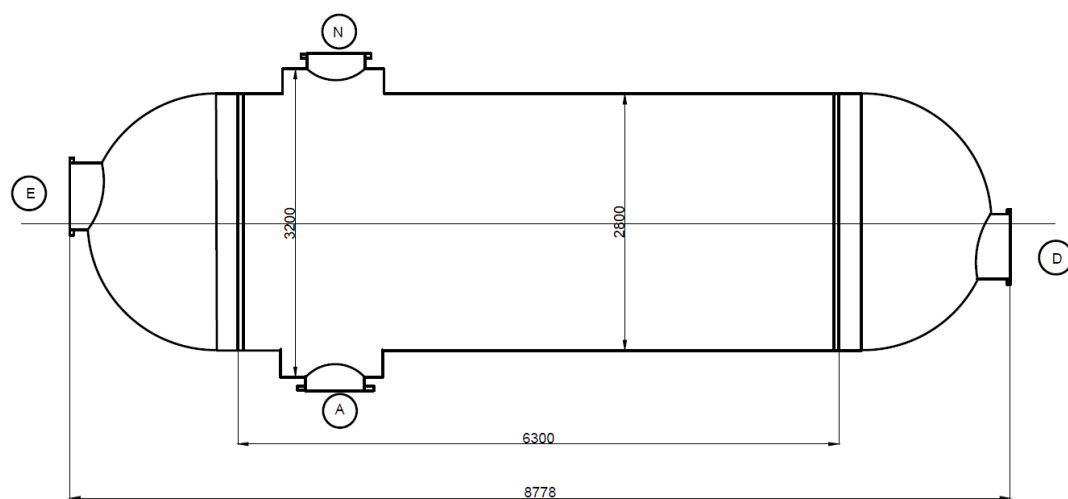


Obr.24 : Postup svařování hrdla



Obr.25: Detail hrdla.

Použité nástroje: jeřáb, manipulátor, úhlová bruska, zakružovací zařízení, ruční svařovací zařízení 135 (MAG), přídavný materiál.



Obr.26: Schéma označení hrdel.

A – Vstup topné páry.

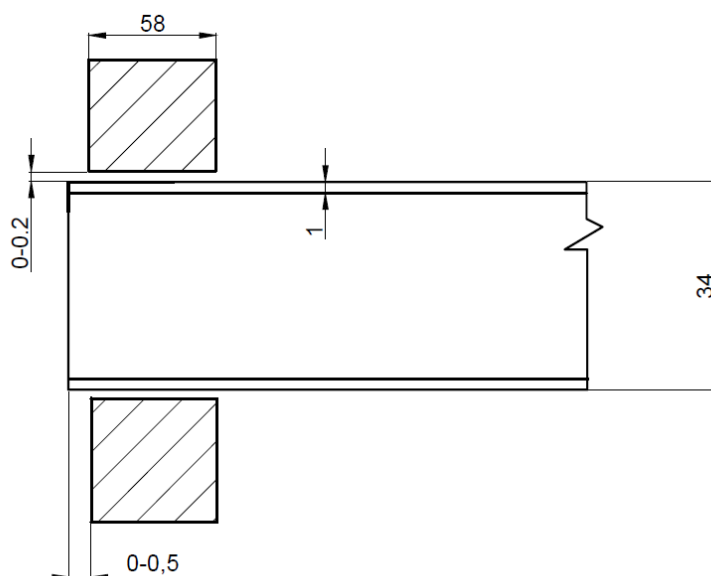
N – Vstup brýdových par.

D – Vstup produktu.

E – Výstup produktu.

4.2.8 Montáž trubek

- Do vnitřního prostoru výměníku nainstalovat přepážky pro zajištění dokonalé výměny tepla a podporu dlouhých trubek.
- Vložit trubky do trubkovnic podle výkresu.



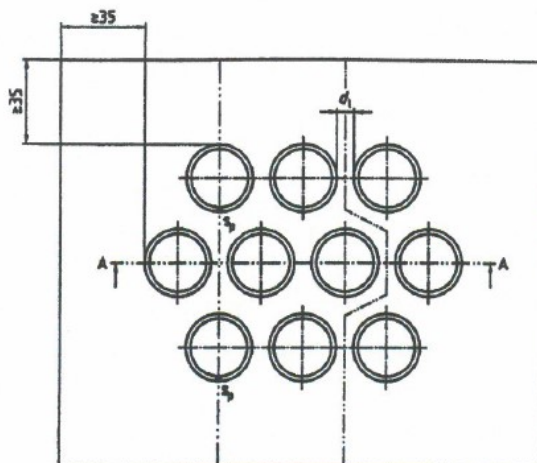
Obr.27 : Uložení trubky v trubkovnici.



Obr.28 : Vnitřní prostor výměníku včetně trubek a přepážek

4.2.9 Svařování trubka-trubkovnice.

- Po montáži trubek zajistit jejich správnou polohu s minimálním přesahem dle schématu na obr. 25.
- Poškozené trubky vyměnit.
- Provést zkušební svary podle ČSN EN ISO 15614-8 (Zkouška postupu svařování).
- Orbitální svařovací hlavu umístit pomocí uchycovacích trnů.
- Provést stehování trubek v trubkovnici.
- Nastavení vhodných svařovacích parametrů s využitím pulsního proudu dle WPS (kapitola 4.3.).
 - Proud [A]: 60, 100
 - Napětí [V]: 9, 10.5
 - Rychlost svařování [mm/min]: 145
 - Průměr elektrody [mm]:
 - Nastavit dráhu elektrody na 365°.
 - Zvolit startovní pozici a nastavit elektrodu na vzdálenost 2 mm od svařovaného materiálu.
- S využitím orbitálního zařízení provést svar.



Značky

- s_1 minimální vzdálenost mezi dvěma trubkami
- s_p výchozí bod kořenové housenky
- A-A základní řezy zkušebního kusu (příklady pro umístění řezů)

Obr.29 : Schéma provedení zkušební svaru podle ČSN EN ISO 15614-8.



Obr.30 : Zkušební svar trubkovnice



Obr.31 : Detail wolframové elektrody



Obr.32 : Detail spoje trubka-trubkovnice.



Obr.33 : Trubkovnice součástí výměníku.

4.3 Schválení postupů svařování (WPS, WPQR)

Specifikace postupu svařování (Welding Procedure Specification) je protokol, kvalifikující jeden ze způsobu schvalování, představující důležitou součást certifikovaného systému řízení jakosti.

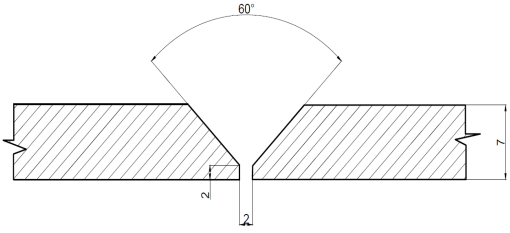
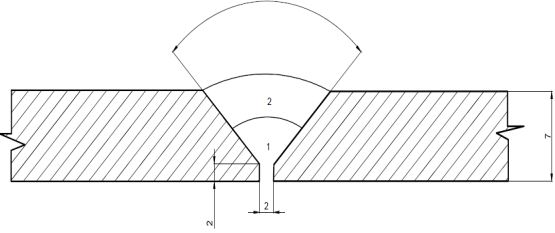
Svařovací dokument WPS jsou dokládány u provedených svařovaných konstrukcí a technických zařízení, v případě, že dojde k mechanickému poškození strojních, stavebních, chemických a jiných zařízení při opravách, montáži a zprovoznění.

Způsoby kvalifikace postupu svařování:

- Stanovení a kvalifikace postupů svařování zkouškou postupu svařování.
 - Podle skupiny norem ČSN EN ISO 15614.
- Stanovení a klasifikace postupů svařování na základě předvýrobní zkoušky svařování.
 - Podle ČSN EN ISO 15613
- Stanovení a kvalifikace postupů svařování na základě normalizovaného postupu svařování.
 - Podle normy ČSN EN ISO 15612.
- Stanovení a kvalifikace postupů svařování na základě předchozí svářečské zkušenosti.
 - Podle ČSN EN ISO 15611.
- Stanovení a klasifikace postupů svařování na základě vyzkoušených svařovacích materiálů.
 - Podle ČSN EN ISO 15610.

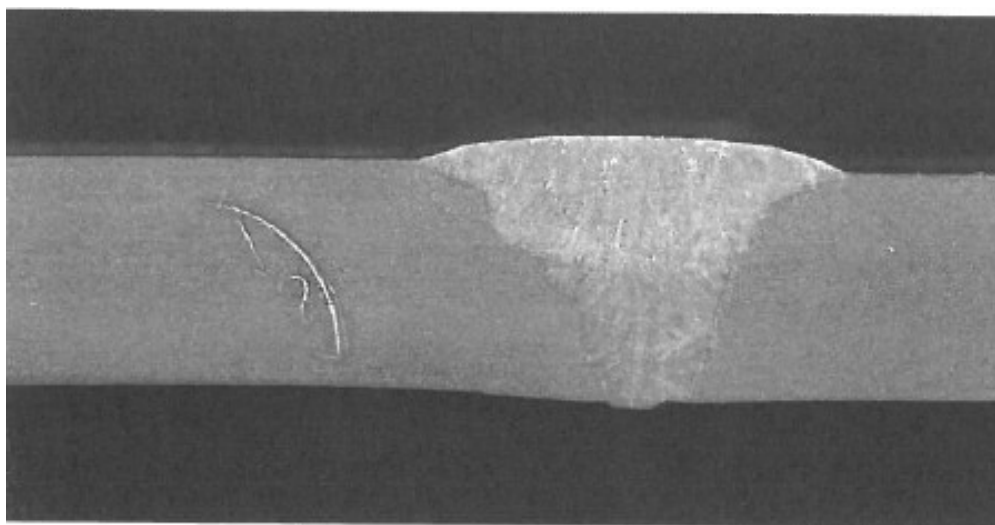
Specifikace postupu svařování (WPS) – obloukové svařování

WPS	Specifikace postupu svařování Welding procedure specification dle ČSN EN ISO 156609-1 Doporučený formulář pro metodu 135 ČSN EN ISO 156607		
WPS v souladu s WPQR		Číslo WPS:1	
Podélný svar:			
Specifikace základního materiálu: 1.4541	Skupina oceli: 8		
Příprava úkosu: obrábění, broušení.			
Polotovary:	rozměr:	tloušťka: 3 mm	
Předehřev základního materiálu: -		Interpass: do 150°C	Dohřev:
Specifikace přídavného materiálu: OK Autrod 318Si	ČSN EN		
Specifikace ochranného plynu: Inertní plyn Argon 98 %.	Volba plynu podle: EN 439		
Poloha svařování: PA	Druh svaru: BW (tupý)	Počet svařovacích vrstev: 2	
Způsob přenosu kovu: Zkratový			
Tvar a rozměr svarových ploch:		Postup svařování:	

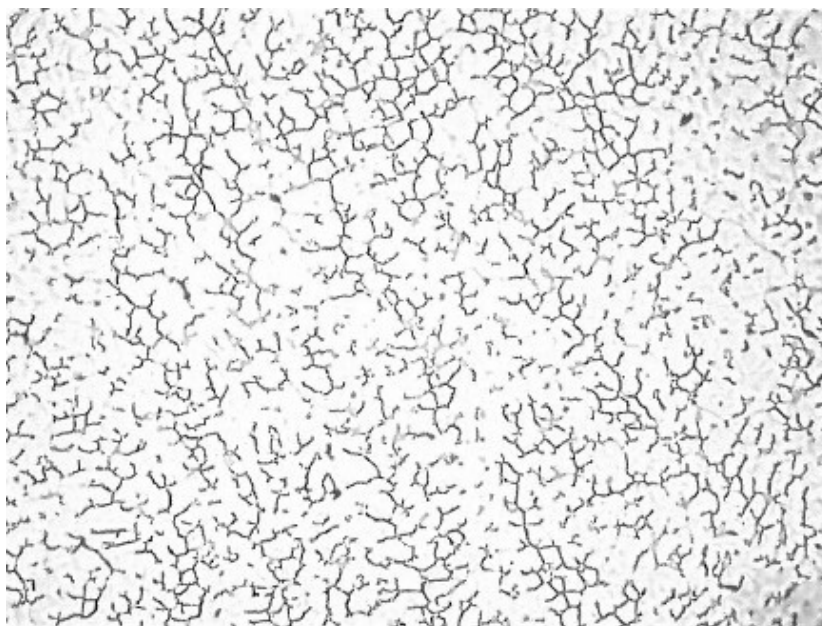
				
Způsob přípravy povrchu před svařováním: chemickým ošetřením, mechanicky broušením				
Úprava svarových vrstev během svařování: NE				
Parametry svařování:				
Pořadí svarové housenky:	1.	2.		
Metoda svařování (podle ISO 4063):	135	135		
Druh svařovacího proudu podle polarity DC/AC +/-	(+)	(+)		
Hodnota svařovacího proudu (A):	130	150		
Hodnota napětí (V):	20	20		
Průměr přídatného materiálu (mm):	1	1		
Průtok plynu (l/min):	10	10		
Rychlost svařování (mm/min)	140	140		
Čištění povrchu svaru: broušení za použití nerezového materiálu.				
místo a datum vydání	razítko a podpis			

Návrh zkoušek podélného svarového spoje

Protokol o provedení zkoušek podélného svarového spoje		
Zákazník:		
Zkoušky požadované zákazníkem:	Zkušební metoda:	Použité postupy:
Makrostruktura Mikrostruktura	EN 1321	1
Postup. 1	Zjišťování vad ve svarových spojích.	



Obr.34 : Makrostruktura svarového spoje.



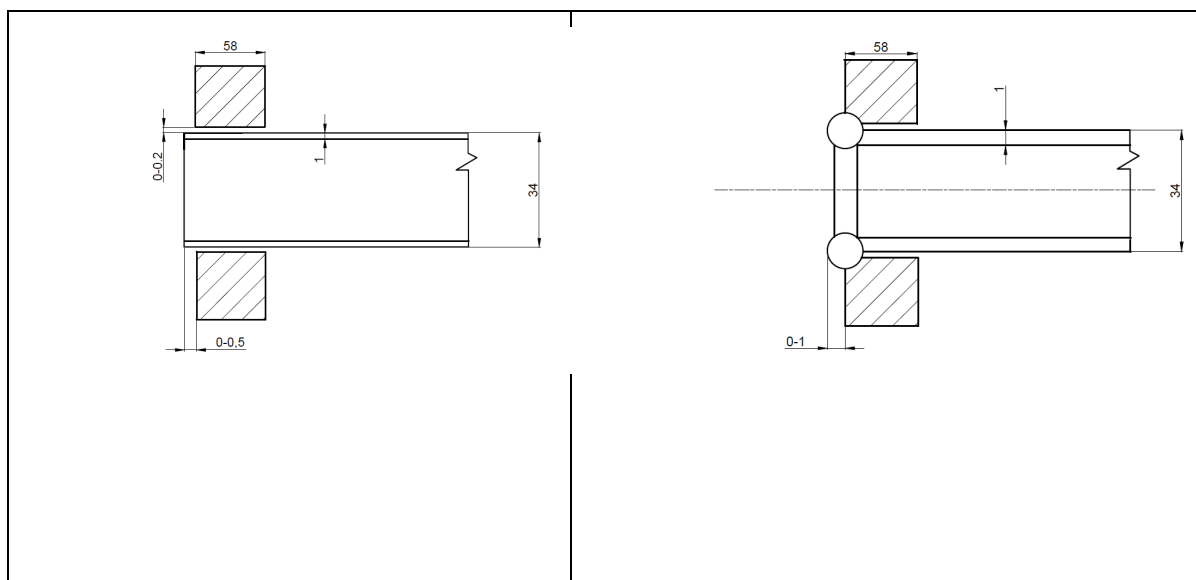
Obr.35 : Mikrostruktura svarového kovu – zvětšeno 100x.



Obr.36 : Mikrostruktura základního materiálu zvětšeno 100x.

Specifikace postupu svařování (WPS) – orbitální svařování

WPS	Specifikace postupu svařování Welding procedure specification dle ČSN EN ISO 156609-1 Doporučený formulář pro metodu 135 ČSN EN ISO 156607		
WPS v souladu s WPQR	Číslo WPS:2		
Svar trubka-trubkovnice.			
Specifikace základního materiálu: 1.4301	Skupina oceli: 8		
Polotovar: trubka	průměr: 34 mm	tloušťka stěny: 1mm	
Předehřev základního materiálu:		Interpass: -	Dohřev: -
Specifikace přídavného materiálu: Svařování bez přídavného materiálu.	ČSN EN		
Specifikace ochranného plynu: Inertní plyn Argon 98 %.	Volba plynu podle: EN 439		
Poloha svařování: PC	Druh svaru: BW (tupý)	Počet svařovacích vrstev: 1	
Způsob přenosu kovu: zkratový			
Tvar a rozměr svarových ploch:		Postup svařování:	



Způsob přípravy povrchu před svařováním: chemickým ošetřením, mechanicky broušením

Úprava svarových vrstev během svařování: NE

Parametry svařování:

Pořadí svarové housenky:	1.			
Metoda svařování (podle ISO 4063):	141			
Druh svařovacího proudu podle polarit DC/AC +/-	(+)			
Hodnota svařovacího proudu (A):	100,60			
Hodnota napětí (V):	9, 10,5			
Průměr přídavného materiálu (mm):	1			
Průtok plynu (l/min):	12			
Rychlost svařování (mm/min)	145			

Čištění povrchu svaru: broušení za použití nerezového materiálu.

WPQR – Protokol o kvalifikaci postupu svařování				
Výsledky zkoušek:				
Návrh nedestruktivních zkoušek:				
Zkouška:	Prováděcí předpis:	Požadavky podle:	Protokol:	Výsledek zkoušky:
Vizuální kontrola	ČSN EN 970	ČSN EN ISO 5817		Vyhovující
Radiografická zkouška	ČSN EN 1435	ČSN EN 12517		Vyhovující
Zkouškana povrchové trhliny	ČSN EN 571	ČSN EN ISO 15614		Vyhovující

DESTRUKTIVNÍ ZKOUŠKY

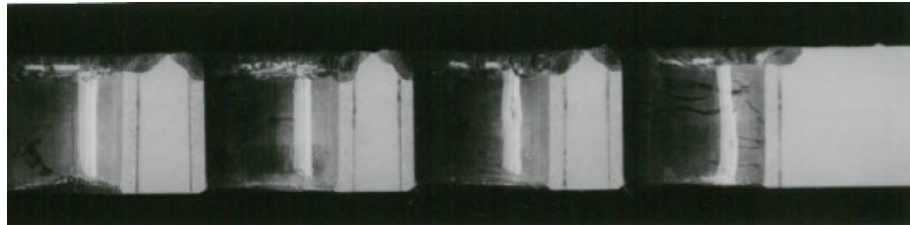
Název zkoušky:		Makroskopická kontrola	
Prováděcí předpis: ČSN EN 1321		Protokol vystavil:	
Požadavek dle: ČSN EN ISO 15614-8		Výsledek zkoušky: vyhovující	
Kritérium: Vady na zkušebním kusu se pohybují v rozsahu stanoveném stupněm jakosti „B“, kromě těchto vad: Nadměrné převýšení tupého nebo koutového svaru, překročení velikosti koutového svaru a nadměrné převýšení kořene.			
Vzorek:	Výsledek:	Poznámky:	
	Vyhovující	Minimální velikost nosného průřezu svaru a= 1mm.	
Druh svarového spoje: Svar trubky s trubkovnicí.			
Kritéria přípustnosti: ČSN EN ISO 15614-8			
Nákres hlavních rozměrů:			

Zkoušení kapalnými penetranty:		
Zkoušené dle: ČSN EN 571	Penetrační systém: IIAd	Stupeň přípustnosti dle:ČSN EN 1289.
Stav povrchu: Po svaření očištěný.		Teplota: 18°C
Čištění před zkouškou: -		
Penetrant: Diffu-Therm BDR	Šarže: 2111	Teplota: 18°C
Odstraňovač penetrantu: Voda		
Vývojka: Diffu-Therm BEA	Šarže: 2311	
Doba penetrace: 15 minut	Vyvolávací doba: 15 min	
Světelné podmínky: 500 Lux		
Zvláštní požadavky:		
Metalografické zkoušení		
Výrobek: Svarový spoj trubka-trubkovnice		
Doplňující údaje o zkoušeném výrobku. Základní materiál: 1.4301 Příprava svarových ploch: svar trubky s trubkovnicí. Metoda svařování: 141 (TIG)		

Výsledky metalografického zkoušení:

Makrostruktura

Makrostruktura vzorku po naleptání leptadlem. Minimální velikost nosného průřezu svaru $a=1\text{ mm}$.



Makrostruktura vzorku je vyhovující.

5 Závěrečné zhodnocení technických parametrů tepelného výměníku

Celková hmotnost prázdného zařízení [kg]: 34217

Hmotnost zařízení plného vody [kg]: 80217

Umístění zařízení: vně

Velikost teplosměnné plochy [m^2]: 2370

Způsob provozu: nepřetržitý

Materiál pláště: 1.4541

Materiál trubek: 1.4301

Technické údaje:	Mezitrubkový prostor:	Trubkový prostor:
Pracovní medium:	pára	voda
Objem [m^3]:	21,5	24,5
Maximální pracovní přetlak [MPa]:	0,37	0,19
Maximální pracovní teplota [$^{\circ}C$]:	141	117
Maximální výpočtová teplota [$^{\circ}C$]:	160	160

6 Závěr

Výroba tepelného výměníku z austenitické oceli podléhá mnoha aspektům, které mají zásadní vliv na jeho provozování. Patří k nim: správná volba konstrukce, volba použitých materiálů, metod svařování se schválenými WPS a WPQR a navržených kontrol. Hlavní cíl diplomové práce byl návrh zařízení, které odpovídá požadavkům zákazníka, je schopné pracovat za stanovených podmínek po celou dobu plánované životnosti konstrukce.

Práce se v první teoretické části zabývá požadavky, kladenými na tlaková zařízení. Svařitelností austenitických korozivzdorných ocelí s ohledem na jejich chemické složení a mechanické vlastnosti. Dále je posuzován navrhovaný základní materiál tepelného výměníku.

Experimentální část práce se zabývá návrhem tlakového celku s typy a použitými technologiemi. Součástí procesu svařování byly provedeny schválené postupy svařování WPQR a WPS pro navržené typy spojů. Další část práce se zabývala technologickým postupem svařování. Ve vlastní výrobě byly stanoveny nedestruktivní kontroly jednotlivých svarových spojů.

Výsledky diplomové práce jsou používány při výrobě tepelných výměníků ve firmě PROMONT a.s..

Seznam použité literatury a norem

- [1] KOUKAL, Jaroslav, Drahomír SCHWARZ a Jiří HAJDÍK. Materiály a jejich svařitelnost. Ostrava: Český svářečský ústav, 2009. ISBN 978-80-248-2025-5.
- [2] KUNCIPÁL, Josef. Teorie a technologie svařování, svařovací stroje a zařízení. Plzeň: Vysoká škola strojní a elektrotechnická, 1980.
- [3] PTÁČEK, Luděk. Nauka o materiálu I. 2., opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, c2003. ISBN 80-7204-283-1.
- [4] Mig-Weld. 10.4.2016 [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: http://www.migweld.de/nc/service/schweissen-nichtrostender-staehle/de-long-diagramm-fuer-normanalyse/?sword_list%5B0%5D=de&sword_list%5B1%5D=long
- [5] EWM AG. . 16.5.2016 [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <https://www.ewm-group.com/en/practical-knowledge/welding-calculators/schaeffler-diagram.html>
- [6] Tlaková zařízení. 10.4.2016 [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <http://www.tlakinfo.cz/t.py?t=2&i=1293>
- [7] Promont a.s.. 10.4.2016 [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <http://www.promont-as.cz/>
- [8] Plechotvářecí stroje. . 10.4.2016 [cit.2016-04-10]. Dostupné z: <http://www.formetal.cz/>
- [9] Esab. 10.4.2016 [cit. 2016-05-5]. Dostupné z: <http://www.esab.cz/>
- [10] Svarinfo. . 10.4.2016 [cit.2016-04-10]. Dostupné z: <http://www.svarbazar.cz/phprs/>

[11] Letovane výmeníky. . 10.4.2016 [cit.2016-04-10]. Dostupné z: <http://www.g-mar.cz/letovane-vymeniky/>

[12] Italinox. . 10.4.2016 [cit.2016-4-10]. Dostupné z: <http://www.italinox.cz/?p1=plechy&p2=p6&p3=p2>

[13] ČSN EN 13 445 “Netopené tlakové nádoby”

[14] ČSN 69 0010 “Tlakové nádoby stabilní”

Seznam příloh

Výrobní výkres

Příloha A HRD0020 – VY – VK – 01

Poděkování:

Poděkování patří firmě PROMONT a.s. za poskytnutí materiálů, dokumentace a informací, s jejichž významnou pomocí vznikla tato diplomová práce. Rád bych poděkoval především technickému řediteli panu Ing. Pavlu Salovi a technologovi Bc. Davidu Stonawski.

Dále děkuji panu doc. Ing. Ivu Hlavatému, Ph.D. za cenné rady, připomínky a vedení práce.

Jan Hrdina